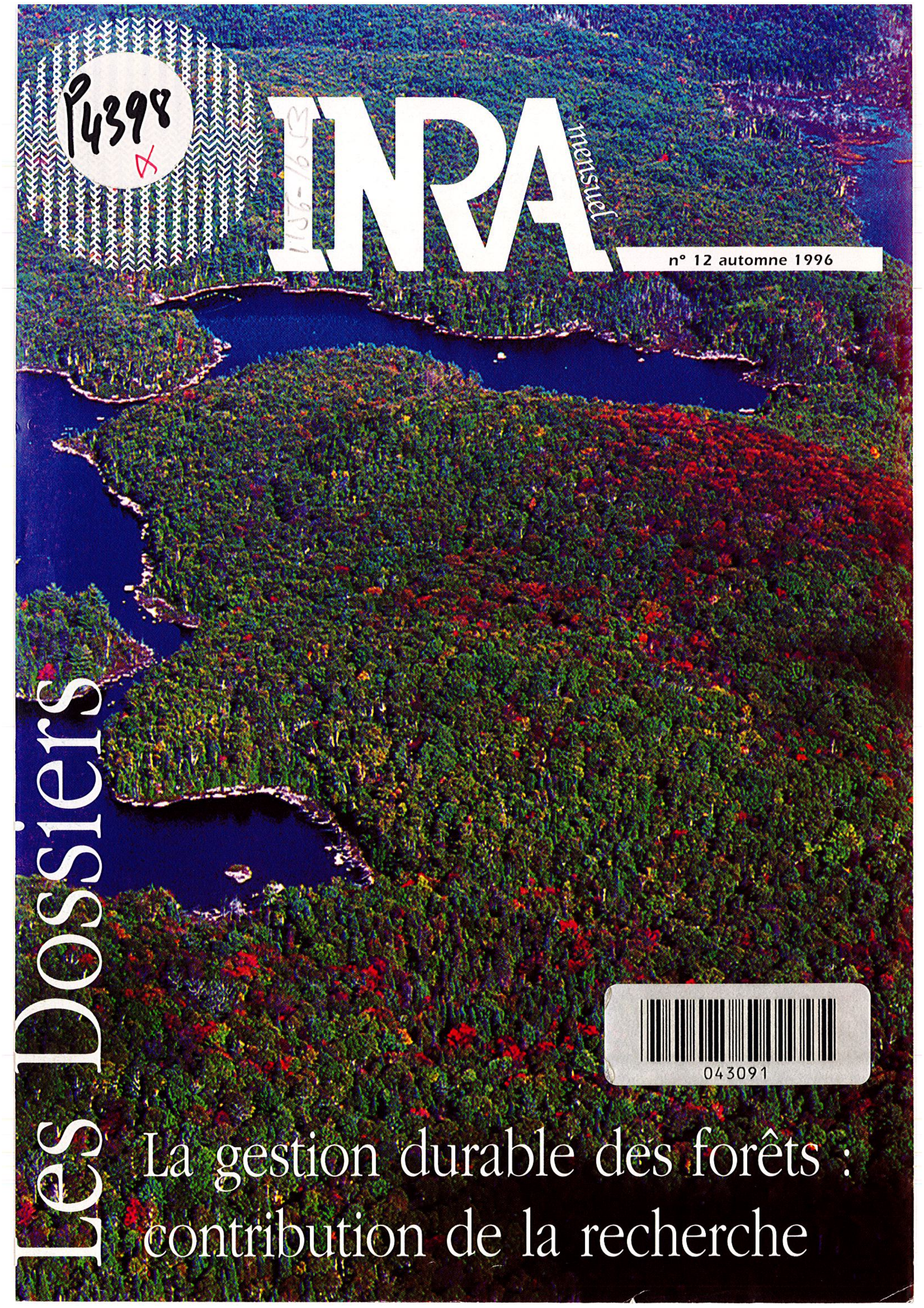

INRA
mensuel
n° 12 automne 1996
Les Dossiers
La gestion durable des forêts :
contribution de la recherche
P4398
043091

La gestion durable des forêts : contribution de la recherche

Sommaire

ERRATUM

Dans le dossier « La gestion durable des forêts : contribution de la recherche » n°12, automne 1996,

Veuillez lire :

- Pierroton au lieu de Pierreton

- pages 34 et 35, dans les légendes :

photo 4 : la « partie fertilisée » est à gauche sur l'image ; la « partie non fertilisée » est à droite.

photos 8a et 8b : les « plants témoins non inoculés » sont en bas ; les « plants inoculés » sont en haut.

- page 44 : la première image de gauche à droite est celle des « fruits et feuilles de bouleau » ; la seconde, le « cône de sapin de Corée ».

L'essentiel sur la forêt française

Surface ■ La France est l'un des pays les plus boisés de l'Union européenne, derrière la Suède et la Finlande. La forêt y couvre 14 millions d'hectares, soit le quart du pays. Avec 136 espèces d'arbres, c'est l'une des forêts les plus riches d'un point de vue écologique.
En surface, les départements métropolitains les plus boisés sont les Landes (60,6%), le Var (56,5%) et les Vosges (47,8%).
Outre-mer, la France dispose d'un patrimoine boisé de 8,8 millions d'hectares, dont 8,3 millions en Guyane, qui recèle une extraordinaire richesse biologique en forêt tropicale.
En 200 ans, la superficie de la forêt métropolitaine a doublé. Aujourd'hui, elle continue de s'étendre tous les ans de 30 000 hectares. Cette expansion est due à une politique ancienne de boisement et à l'abandon plus récent de terres agricoles.
En 1994, les forêts de plaines et de collines représentent 61,7% de la surface totale ; la forêt de montagne 29,6% et les forêts méditerranéennes 8,7%.

Feuillus/résineux ■ En France, la forêt est au deux tiers feuillue et pour le reste résineuse. Le chêne et le hêtre prédominent. C'est une caractéristique bien française et de l'Europe tempérée. La part de résineux atteint 70% en Allemagne, dans les îles Britanniques ou au Danemark.

Privée/publique ■ La forêt est essentiellement privée : 70% des surfaces forestières appartiennent à des particuliers. Les forêts dites publiques appartiennent à l'Etat (forêts domaniales), à des collectivités ou à des établissements publics. Les forêts domaniales, au nombre de 1 500, couvrent 1,7 million d'hectares. Les autres forêts publiques sont surtout des forêts communales : 10500 communes forestières sont propriétaires de 2,8 millions d'hectares.
Les forêts dites publiques sont gérées par l'Office National des Forêts, qui a succédé en 1966 à l'Administration des Eaux et Forêts. Il surveille, entretient et protège les espaces forestiers et naturels qui lui sont confiés. Il en assure la mise en valeur écologique, économique, touristique et paysagère.

Production de bois ■ En France, la récolte de bois est inférieure à la production biologique de la forêt. La forêt totalise un volume de bois sur pied de 1,8 milliard de mètres cubes, qui s'accroît de 75 millions de mètres cubes par an : on en récolte seulement 55 millions chaque année.

D'après "Les hommes et la nature" 1996, ONF, 2 avenue de Saint-Mandé 75570 Paris cedex 12.

Diversité biologique ■ Le nombre d'espèces liées au milieu forestier ou ubiquistes est très élevé, environ 1000 espèces. En revanche, le nombre de ces espèces vulnérables et en danger, ne serait que d'une trentaine.
On dénombre 32 espèces de mammifères dont 6 de milieu strictement forestier. Les espèces en danger ou vulnérables sont au nombre de 11. La population des ongulés (cerfs, chevreuils) a augmenté d'une manière considérable au cours des 20 dernières années : elle a doublé pour le cerf, triplé pour le chevreuil.
Les oiseaux comptent une cinquantaine d'espèces dans les milieux strictement forestiers ou non, 8 espèces sont en danger ou vulnérables.

Source pour tous les autres paragraphes :
les indicateurs de Gestion Durable des Forêts Françaises - DERF - 1994

La forêt mondiale en quelques chiffres

• Répartition des surfaces en millions d'hectares

Amérique du Sud	898
Communauté des États Indépendants (CEI)	754
Afrique	535
Amérique du Nord	530
Asie	463
Europe	140
Océanie	87

source : FAO 1990

• Evolutions récentes des surfaces boisées en millions d'hectares

Zone géographique	Surface des forêts en 1980	%	Surface des forêts en 1990	%	Evolution 90/80
Boréale	920	25	920	27	0
Tempérée	766	21	777	23	+11
Tropicale	1 924	54	1 753	50	-171
Monde	**3 610**	**100**	**3 450**	**100**	**-160**

source : CEE/FAO 1992

La gestion durable des forêts : une demande forte de la société à la communauté scientifique

"Les Maîtres des Forêts (...) enquerront et visiteront toutes les forêts et bois qui y sont et feront les ventes qui y sont à faire, eu regard à ce que les dites ***forêts et bois se puissent perpétuellement soutenir en bon état."***

Cet extrait de l'Ordonnance Royale sur les Forêts édictée à Brunoy par Philippe de Valois le 29 mai 1346, il y a tout juste 650 ans, devrait inciter à quelque humilité nombre de nos contemporains qui ont érigé la gestion forestière durable en un "nouveau paradigme". Comment ne pas rappeler ce pied de nez de l'histoire en commençant ces lignes ?

La forêt est depuis une quinzaine d'années fréquemment sous les projecteurs médiatiques, et les conférences technico-politiques qui y sont consacrées se succèdent à un rythme soutenu. Ce mouvement a eu pour origine les craintes développées à la suite du dépérissement des forêts observé dans l'hémisphère nord au début des années 80, mais aussi les graves préoccupations résultant de la déforestation massive des régions tropicales, et enfin certaines pratiques de gestion forestière de type minier (Amérique du Nord par exemple). De nombreuses initiatives nationales, multilatérales, mondiales se développent actuellement soit en parallèle, soit en concurrence.

Les enjeux politiques, dont les rapports Nord-Sud et les pressions exercées par les Organisations Non Gouvernementale (ONG) environnementalistes sont des composantes notables, mais aussi les enjeux économiques liés aux industries forestières, sont bien entendu omniprésents. Dans ce contexte, la science n'apparaît pas très bien placée, non pas qu'elle n'ait rien à dire sur le sujet, mais elle se trouve souvent reléguée en dehors du débat. Ceci est dû à plusieurs raisons : dans le foisonnement des initiatives qui ont suivi la conférence de Rio, les scientifiques sont eux-mêmes divisés ou s'expriment par la voix de "ténors" soucieux de notoriété ; les discussions sont souvent dominées par la passion ou par le dogmatisme plus que par la rigueur, laissant peu de place à la démarche scientifique ; enfin les solutions à apporter n'ont pas toujours à procéder de la science.

Partant de préoccupations parfaitement légitimes sur les graves menaces pesant sur la pérennité de ces ressources naturelles majeures que constituent les forêts, et sur les conséquences environnementales de leur régression ou de leur mauvaise gestion, le débat est devenu largement idéologique. L'émergence du concept - peu précis, il faut le souligner - de gestion et/ou de développement durable, dont la biodiversité n'est qu'un des éléments, ne contribue pas vraiment à clarifier le débat. Sur la planète forestière on assiste au développement d'une "pensée unique" proche du "politiquement ou technologiquement correct". Derrière ce langage apparemment unificateur se cachent des réalités très diverses en termes de pratiques forestières : il y a parfois un fossé entre ce qui est dit et ce qui est fait.

De la même façon on confond largement les forêts naturelles des pays tropicaux avec celles des pays tempérés qui ont été fortement modelées par l'homme ou qui sont même artificielles.

Toutefois, toute cette effervescence au plan national et international est en train ou va se traduire par des retombées importantes : réglementations ou législations nouvelles parfois pertinentes, parfois moins justifiées comme par exemple la directive communautaire "Habitats" se traduisant par le réseau Natura 2000, futures procédures d'écocertification de la production forestière qui vont peser sur les propriétaires forestiers et sur la compétitivité des industries.

Mon point de vue est que l'expertise scientifique est, dans ce domaine, plus que jamais nécessaire : je rappellerai simplement la définition que la Conférence Ministérielle d'Helsinki en 1993 a donnée de la gestion forestière durable :

La gestion durable des forêts signifie la "bonne gérance" et l'utilisation des forêts et des terrains boisés, d'une manière et d'une intensité telles qu'elles maintiennent leur diversité biologique, leur productivité, leur capacité de régénération, leur vitalité et leur capacité à satisfaire, actuellement et pour le futur, les fonctions écologiques, économiques et sociales pertinentes aux niveaux local, national et mondial, et qu'elles ne soient pas dommageables à d'autres écosystèmes.

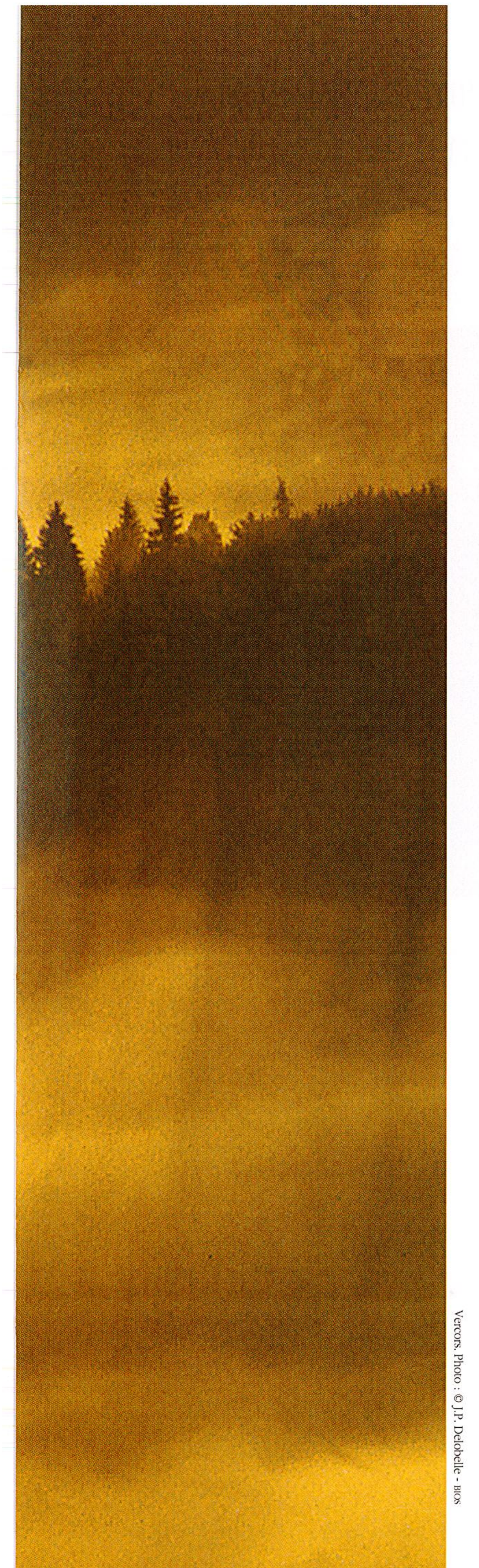
Si l'on analyse bien tous les termes de cette (longue !) définition, il est facile d'imaginer les nombreuses questions scientifiques sous-jacentes. On réalisera alors que la gestion forestière durable, elle-même intégrée dans la gestion de l'espace rural, nécessite bien des fondements scientifiques diversifiés et solides. En cette année du cinquantième anniversaire de la création de l'INRA, le souhait de ce dossier est d'illustrer la contribution scientifique de l'Institut et de certains de ses partenaires, pour faire de la gestion durable une réalité.

Le document présenté ici est organisé selon cinq éléments majeurs sous-tendant la gestion forestière durable :
- climats et forêts
- les forêts et leurs sols
- la biodiversité
- dynamique des forêts et des peuplements
- les hommes et leurs forêts

Le volume imparti par le cadre de la publication a conduit à faire des choix privilégiant les aspects environnementaux et la dimension humaine des programmes de recherche. Par exemple, le lecteur ne trouvera rien concernant les recherches sur le bois, ni sur la physiologie du développement. En outre, certains thèmes, cependant à forte connotation environnementale, tels que les recherches sur les incendies de forêt ou le dépérissement des forêts, développés dans le précédent dossier "Forêt" (n°5, 1991), n'ont pas été repris dans le présent numéro. Globalement, on s'est efforcé dans ce dossier "gestion durable" d'illustrer davantage l'approche écosystémique des recherches plutôt que les études fines de mécanismes.

Yves Birot,
INRA, chef du Département des Recherches Forestières,
Avenue Vivaldi, 84000 Avignon ■





Vercors. Photo : © J.P. Delobelle - BIOS

Forêts et climats

Organismes à longue durée de vie, les arbres sont soumis aux importantes fluctuations du climat dont les composantes sont multiples : températures, pluies, teneur en CO_2 en augmentation, pollutions atmosphériques, ouragans, ... et peuvent affecter gravement leur stabilité. Couvrant des surfaces importantes aux niveaux local, régional ou mondial, les forêts influent aussi sur le régime des eaux, les systèmes climatiques régionaux, le cycle du carbone ; à ce titre les forêts sont aussi les éléments d'un environnement durable.

Pour illustrer ces relations d'interactions, trois thèmes seront présentés. Le premier concerne les relations entre climats et forêts aux niveaux local, régional ou planétaire. Le deuxième thème traite du problème de l'impact sur les arbres et les forêts de l'élévation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Enfin, le thème de la forêt et de l'eau, ô combien d'actualité, est évoqué.

1 Des interactions entre climats et forêts aux niveaux local, régional ou planétaire

En raison de l'importance de leur biomasse et des dimensions des arbres, principaux éléments constitutifs de leur structure, les forêts influencent considérablement les échanges de masse et d'énergie entre l'atmosphère et le sol : interceptant le rayonnement solaire, freinant la vitesse du vent, fixant le gaz carbonique de l'air et évapotranspirant des quantités importantes d'eau. Mais si la forêt influence le climat, il est certain qu'elle en dépend directement : elle exige un minimun de température notamment pendant la saison de végétation et un minimun de pluviosité.



Photo : M. Pitsch

En fonction de ces facteurs, on a pu décrire de grands types de forêts ; par exemple : la forêt dense des régions tropicales et équatoriales à pluies permanentes et humidité atmosphérique très élevée, la forêt xérophile [1] des climats méditerranéens ou californiens à forte sécheresse estivale, les forêts de conifères à feuilles persistantes des régions tempérées froides (Scandinavie, Sibérie, Canada).

Malgré un accroissement relatif incontestable des recherches en milieu tropical dans les dernières années, le niveau des informations disponibles est encore inférieur à celui concernant les régions tempérées et froides.

L'effet de la forêt sur le climat est un sujet controversé et qui n'est pas facile à traiter dans la mesure où l'expérimentation est difficile, voire impossible. En fait plusieurs approches de ce problème ont été utilisées : méthodes expérimentales, historiques et modélisation [2]. Sur la base des résultats obtenus à partir de ces différentes approches il est possible de tenter de faire le point sur les relations forêt-climat en remarquant que bien des incertitudes demeurent encore.

Le point sur les relations forêt-climat

Les relations forêt-climat doivent être analysées sur la base des échanges de masse, d'énergie et de quantité de mouvements entre la forêt et l'atmosphère et relèvent pour l'essentiel d'une analyse micrométéorologique. À cette échelle les phénomènes sont relativement bien connus même s'ils méritent encore d'être précisés.

Au plan des échanges radiatifs les différences entre forêt et terrain découvert peuvent avoir plusieurs origines : d'abord des différences d'albedo [3] ; en moyenne l'albedo des forêts est plus faible (0.11) que celui des prairies (0.20). La forêt constitue donc un piège à rayonnement solaire plus efficace que toute autre formation végétale. Ensuite les différences dans les échanges radiatifs entre couvert forestier et terrain découvert peuvent aussi provenir des différences de température de surface des couronnes des arbres en relation avec l'importance de l'évapotranspiration.

L'énergie d'origine radiative (rayonnement net) est de fait répartie entre deux flux : le flux de chaleur latente correspondant à l'évapotranspiration et le flux de cha-

[1] Garrigue, maquis ou chapparral.

[2] • la méthode expérimentale qui consiste à comparer le climat dans la zone forestière et à l'extérieur. Dans cette démarche il ne faut qu'aucun paramètre autre que l'influence du couvert forestier vienne perturber la comparaison ; cela n'est possible que dans quelques rares situations, ce qui limite finalement les possiblités d'explorer des exemples variés eu égard à la géomorphologie et au climat ;
• la méthode historique consiste d'abord dans l'étude comparée pendant plusieurs années des caractéristiques climatiques dans une zone forestière et une zone de terrain découvert (agricole ou autre) ; puis dans l'observation et la mesure des modifications des caractéristiques climatiques entraînées par l'enlèvement de la forêt comparativement au terrain découvert ;
• la modélisation utilisée à différentes échelles d'espace, notamment à l'échelle régionale et globale avec des modèles numériques de fonctionnement de l'atmosphère (General Circulation Models) et de la biosphère.

[3] Fraction réfléchie du rayonnement solaire de courte longueur d'onde.

leur sensible (flux de convection) du couvert forestier vers l'atmosphère. Le flux de chaleur latente a deux origines principales : la transpiration des arbres et l'évaporation des précipitations interceptées par le couvert ; or l'interception représente de 20 à 50% des précipitations annuelles. Cette interception des précipitations constitue certes une perte importante pour les sols forestiers, comparativement aux prairies et cultures, mais représente par contre un apport supplémentaire de vapeur d'eau pour l'atmosphère au-dessus des forêts.
Le couvert forestier (biomasse et air à l'intérieur des peuplements) stocke de la chaleur par échauffement dans la journée des troncs, des branches et des feuilles. D'une façon générale la chaleur est emmagasinée dans la matinée et restituée à l'atmosphère en soirée. Des températures de surface supérieures de 8°C à celles de l'air extérieur ont pu être mesurées. Cette restitution de chaleur à l'atmosphère en fin de journée pourrait être à l'origine de l'accroissement des phénomènes de convection et induire des précipitations orageuses en présence d'air plus humide au-dessus des forêts.
Du point de vue aérodynamique (effet de rugosité) les couverts végétaux sont principalement caractérisés par deux paramètres : la hauteur de déplacement (0.8 fois la hauteur moyenne de la végétation) et la hauteur de rugosité qui varie de 1 cm pour un gazon à 3 m pour une forêt. D'une façon générale le couvert forestier a pour effet de ralentir le déplacement des masses d'air dans les basses couches. Ce ralentissement, qui a pour résultat de soulever les masses d'air et donc d'accentuer les phénomènes d'ascendances, peut avoir pour effet de favoriser la condensation de la vapeur d'eau. Par ailleurs, au-delà de ces phénomènes, lorsqu'une masse d'air aborde un massif forestier, ses caractéristiques thermiques et hydriques se modifient au fur et à mesure de son déplacement, du fait de la structure verticale du couvert et de l'évapotranspiration. Il faut atteindre une certaine distance à l'intérieur du peuplement pour qu'un nouvel équilibre s'établisse entre les caractéristiques de la masse d'air considérée et les flux de vapeur d'eau, de CO_2 et de chaleur libérés ou fixés par le couvert ; ce phénomène appelé "effet d'oasis" est d'autant plus important que les caractéristiques (hydriques et thermiques) des couverts forestiers et non forestiers sont différentes.

Pour l'étude des climats plusieurs échelles d'espace sont généralement considérées : l'échelle planétaire pour des distances de l'ordre de 1000 km, les climats régionaux (100 km), les climats locaux (1 à10 km) et les microclimats (10 à 100 m). À chaque échelle d'espace les influences de la forêt dépendent des dimensions mêmes de la forêt. De fait il est très difficile de déterminer les dimensions minimales que doit atteindre un massif forestier pour avoir une influence significative sur le climat à l'échelle locale et régionale. Certains auteurs pensent, sans en donner la preuve, que l'ordre de grandeur relève de la centaine d'ha.

Échelle microclimatique

À l'échelle microclimatique la forêt agit sur le rayonnement solaire, les précipitations, l'humidité de l'air, la température, le vent et le pouvoir évaporant de l'air. Il existe donc dans et sous le couvert forestier, toutes choses égales par ailleurs, un climat différent de celui qui peut être défini en plein découvert. Ce microclimat affecte le fonctionnement élémentaire et global de la forêt et conditionne la vie des arbres depuis leur installation comme semis ou plants jusqu'au moment où ils meurent ou sont exploités par le forestier. Les phénomènes de floraison, fructification, germination, photosynthèse, transpiration et croissance sont tout particulièrement concernés. Le rôle que joue la forêt varie suivant l'espèce considérée, le type de peuplement (hauteur, structure, densité, ...) et le climat.

Le rayonnement solaire

Le couvert forestier reçoit une quantité d'énergie liée à la position du soleil et aux conditions de nébulosité ; c'est le rayonnement global (en $W.\ m^{-2}$), somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement diffusé par l'atmosphère. Une partie est réfléchie vers le ciel, c'est l'albedo qui est variable selon les espèces et les types de couvert, par exemple 0.12 en hiver et 0.18 en été pour les feuillus et 0.12 pour les résineux. L'épaisseur du couvert et l'orientation des feuilles conditionnent la réflection du rayonnement mais aussi sa pénétration dans le couvert forestier. De fait il y a interaction : en effet les caractéristiques du rayonnement conditionnent l'anatomie, la morphologie et la physiologie des feuilles mais inversement celles-ci modifient l'importance et la qualité du rayonnement. Le rayonnement qui n'est pas réfléchi pénètre dans le couvert et est absorbé par les feuilles ou bien est transmis vers le sol. L'absorption est très importante pour les radiations visibles et faible pour l'infrarouge ; globalement on peut dire que la lumière en forêt est riche en infrarouge et pauvre en ultraviolet. Au fur et à mesure que le rayonnement pénètre dans le couvert il décroît rapidement, cette variation peut être exprimée par une équation exponentielle négative. C'est ainsi que le rayonnement global sous une chênaie représentera 20% du rayonnement global incident contre 40% dans un peuplement de pin

d'Alep, 20% pour une futaie de pins sylvestres, 5% dans une hêtraie et 1-2% dans un peuplement dense d'épicéas. Dans ces deux derniers cas la qualité et l'importance du rayonnement disponible limitent fortement le développement des végétaux du sous-bois. Le maximum d'interception du rayonnement solaire se produit au moment du maximun de production (accroissement courant maximum) des peuplements, c'est-à-dire entre 50 à 80 ans selon les espèces considérées.

Dans les trouées le rayonnement disponible (% du plein découvert) dépend de la dimension relative de l'ouverture, c'est-à-dire du rapport diamètre de la clairière sur hauteur du peuplement environnant ; par exemple au centre d'une clairière 13% pour un rapport égal à 1 et 50% pour un rapport égal à 2. Dans les bandes forestières le rayonnement disponible dépend aussi de leur dimension relative mais aussi de leur orientation.

D'une façon générale il faut remarquer qu'à un niveau d'éclairement déterminé vont correspondre d'autres caractéristiques climatiques telles que température, vent, évapotranspiration ; il en résulte que la seule prise en compte de l'éclairement relatif permet de définir un microclimat particulier plus ou moins proche du climat extérieur.

La température

La température de l'air dans et sous le couvert forestier varie dans le même sens que le rayonnement solaire, source principale de chaleur pour la végétation, la couche superficielle du sol et l'air. La nuit les températures dépendent de l'importance des pertes énergétiques des surfaces végétales, des structures de couvert et des conditions atmosphériques (humité de l'air et vitesse du vent). En forêt, comme au-dessus d'un sol nu, la répartition des températures est différente le jour et la nuit ; mais dans un peuplement forestier le profil thermique est perturbé car les biomasses végétales (feuillage, branches, troncs) qui absorbent et émettent le rayonnement sont distribuées sur une épaisseur variable selon le type de peuplement. D'une façon générale dans la journée les couronnes absorbent une partie du rayonnement global et chauffent l'air ambiant d'où des températures maximales à leur niveau. L'abaissement nocturne de température est d'autant plus important qu'aucun obstacle ne fait écran entre les surfaces végétales et l'atmosphère. La température est donc minimum dans la partie supérieure du couvert. Au niveau du sous-bois le refroidissement est freiné par les couronnes. Ainsi, d'une façon générale, on peut dire que le climat sous le couvert végétal est tamponné, les variations thermiques journalières et saisonnières sont amorties par rapport à l'extérieur : maxima plus faibles et minima plus élevés. Ces effets thermiques sont aussi perceptibles dans les sols forestiers qui sont plus chauds en hiver et plus frais en été que les sols des zones découvertes. Concrètement l'effet modérateur du couvert sur le microclimat forestier a pour conséquences de limiter pour les semis et les jeunes plants les dégâts de gelées au printemps et de limiter l'élévation extrême de température (70 °C) qui peut se produire en été à la surface des sols en coupes rases.

Les interventions sylvicoles (éclaircies, clairières, bandes, coupes d'abri) ou les chablis [4] ont pour effet de perturber ces effets du couvert forestier en rapprochant le climat thermique de celui de zones ouvertes. On sait cependant que les clairières, d'un diamètre inférieur à trois fois la hauteur du peuplement environnant, ont un effet modérateur (4 à 5°C de plus) sur la gravité des gelées tardives et peuvent être utilement utilisées pour la sylviculture de certaines espèces sensibles. Au delà d'un diamètre supérieur à 6 fois la hauteur du peuplement voisin on estime que le climat dans la clairière est voisin du plein découvert.

[4] Arbres abattus par le vent.

Les coupes d'abri sont efficaces contre les gelées tardives mais elles présentent alors un couvert important dispensant un éclairement relatif faible (15% à 20%) qui limite très fortement la croissance des semis et des jeunes arbres.

En ce qui concerne les coupes d'ensemencement utilisées classiquement pour la mise en régénération naturelle des peuplements, on ne dispose pas d'informations précises, mais en se référant à quelques résultats fragmentaires, on peut penser que l'ouverture du couvert en augmentant les pertes radiatives a pour conséquences d'augmenter les risques de dégâts de gelée pour les semis, notamment dans le cas où le sylviculteur ne conserve ou ne peut disposer que d'un très faible nombre d'arbres semenciers.

Les bandes forestières ont des effets voisins des effets des brise-vent utilisés en agriculture, à savoir une légère accentuation des risques de gelées, liée au ralentissement de la vitesse du vent qui favorise la stratification de l'air froid et à un stockage thermique limité dans les interbandes boisées.

L'humidité de l'air

L'humidité absolue de l'air (kg.m^{-3}) en forêt n'est pas très diffférente de celle observée en plein découvert, par contre l'humidité relative est généralement plus élevée en relation avec des températures plus basses en forêt. Dans les clairières, les peuplements éclaircis et les bandes forestières, on observe que l'humidité relative est intermédiaire entre les coupes rases et les peuplements fermés.


Photo : D. Feuillas

Le vent

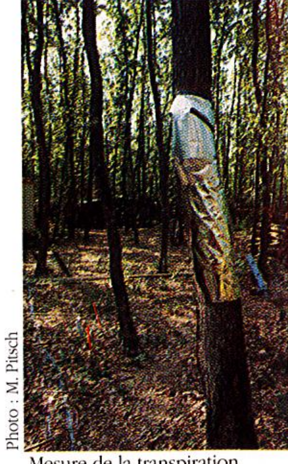
La forêt exerce une influence notable sur le vent ; ce dernier constitue d'ailleurs un facteur déterminant pour la vie de la forêt par les variations de température et d'humidité qu'il peut entraîner ; et aussi par son action mécanique et physiologique directe sur la transpiration et la photosynthèse. À faible vitesse, en diminuant la résistance au transfert dans la couche limite entourant les feuilles, il favorise la transpiration. Il influence aussi la température des feuilles en accélérant les échanges convectifs. La réaction des espèces forestières à l'augmentation de la vitesse du vent est variable mais au-delà de 15 $m.s^{-1}$, il y a généralement une baisse de la transpiration et de la photosynthèse liée à une fermeture des stomates des feuilles afin de réguler les échanges.

L'effet de la forêt sur le vent est d'autant plus marqué que son couvert est dense et stratifié et que sa hauteur est importante. Une réduction de 80% de la vitesse du vent est d'observation courante dans les peuplements.

Les éclaircies et les trouées en réduisant le couvert favorisent la pénétration du vent et les phénomènes de turbulence qui peuvent se traduire par des chablis importants si les arbres restants n'ont pas pu coloniser l'espace libéré et développer un système racinaire adapté aux nouvelles conditions de ventilation. D'une façon générale on observe qu'à vitesse égale le vent a un effet dévastateur plus important s'il souffle d'une direction inhabituelle dans la région considérée. En effet au cours de leur croissance les arbres ont progressivement adapté toute leur architecture tant aérienne que racinaire aux contraintes imposées par les vents soufflant de la direction la plus fréquente. D'une façon générale on admet que la diminution de la vitesse du vent dans les clairières, les bandes forestières (15-50% selon les dimensions) et les brise-vent, a pour effet d'améliorer les conditions microclimatiques (évapotranspiration) et de favoriser la croissance des végétaux.

Les précipitations et l'évapotranspiration

Les précipitations sont fortement influencées par le couvert forestier. À l'échelle annuelle, l'interception représente de 20 à 50% des précipitations incidentes (selon le type de peuplement et de climat) et explique en grande partie (40% du total annuel) l'importance de l'évapotranspiration des peuplements forestiers comparativement aux autres couverts végétaux. Globalement cette forte évapotranspiration des forêts entraîne une consommation élevée d'énergie qui se traduit dans le courant de la journée au-dessus des couverts forestiers, par des températures généralement plus basses, comparativement aux autres cultures.


Photo : M. Pitsch

Mesure de la transpiration.

L'ouverture du couvert (éclaircies, clairières, bandes, coupes rases) en diminuant l'interception des précipitations et la transpiration, a pour effet d'augmenter l'humidité du sol qui favorise la croissance des arbres. Dans certains sols peu perméables, l'excès d'eau peut avoir un effet défavorable sur la croissance des semis et même des arbres, si cette eau est superficielle et présente pendant la saison de végétation.

En conclusion, à l'échelle de la parcelle, les conditions microclimatiques sont fortement influencées par les caractéristiques dimensionnelles des peuplements. Dans un certain nombre de cas le forestier peut mettre à profit ces phénomènes en modulant l'importance du cou-

vert, pour favoriser la création de conditions microclimatiques favorables à la croissance des semis et des plants. C'est ainsi qu'il est maintenant expérimentalement bien établi que la plupart des espèces forestières ont dans le jeune âge la meilleure croissance pour des éclairements relatifs voisins de 45 à 55%. En effet, ce niveau d'éclairement définit des caractéristiques climatiques (au plan thermique et hydrique) très favorables à l'activité photosynthétique (contraintes hydriques limitées) et à la croissance des très jeunes arbres (5-10 ans). Lorsque les arbres sont plus âgés, le niveau d'éclairement devient insuffisant plus ou moins rapidement selon les espèces et doit être porté à 100% pour permettre une croissance optimale.

Échelle locale et régionale

À l'échelle locale, la mise en évidence des influences de la forêt est difficile dans la mesure où elle nécessite l'utilisation sur de longues périodes de réseaux bien répartis et denses de recueil de données météorologiques, ce qui n'existe pratiquement pas à l'heure actuelle. Par ailleurs les expérimentations contrôlées nécessitent des interventions d'une telle ampleur sur la couverture forestière, et dans des situations topographiquement et géographiquement comparables, qu'elles ont été très rarement réalisées.

Globalement, il apparaît que l'existence de températures plus basses et d'une humidité atmosphérique plus élevée au-dessus des couverts forestiers que sur les terrains agricoles voisins, aurait pour conséquence une augmentation des précipitations dans la zone non boisée située sous le vent du massif forestier. Un tel résultat a été mis en évidence en France dans les Landes (Projet HAPEX-MOBILHY) pour une zone de 100Km de côté, boisée à 40%. En Champagne crayeuse, une étude sur la base du réseau pluviométrique régional semble mettre en évidence un possible effet d'amortissement des baisses de pluviométrie estivale par les boisements de pins sylvestres. Ces résultats, bien que s'appuyant sur des données insuffisantes, sont cohérents avec ce que laissent entrevoir d'une part l'analyse des échanges de masse et d'énergie des couverts forestiers et d'autre part les résultats des études réalisées à partir de modèles. Finalement, il est actuellement difficile d'avancer des chiffres précis de surplus pluviométriques, encore que 1 à 2% d'augmentation annuelle soient souvent cités dans la bibliographie.

En dehors de grands massifs forestiers de plusieurs milliers d'ha d'un seul tenant, se pose le problème des paysages bocagers ; on ne dispose malheureusement pas de données chiffrées, mais on peut cependant penser que dans ce cas par rapport à une zone totalement déboisée et notamment agricole, il doit exister un effet climatique, notamment thermique lié à une forte évapotranspiration des bouquets d'arbres, des haies et des petits massifs forestiers consommant l'énergie advective provenant des zones agricoles voisines. Mais cet effet est difficile à mettre en évidence directement.

Échelle globale

À l'échelle globale, les effets de la forêt sur le climat et notamment la pluviométrie ne peuvent être mesurés et doivent être évalués par les techniques de modélisation. Ce type d'approche a été utilisé à l'échelle du bassin amazonien où l'hypothèse testée a été la déforestation totale du massif forestier qui couvre 5 millions de Km^2. Les résultats de cette simulation prédisent une augmentation importante de la température de l'air de l'ordre de 1-3°C, liée à la baisse de l'évapotranspiration (baisse de l'interception des précipitations et de la transpiration). De plus, en conséquence de la diminution des apports de vapeur d'eau dans l'atmosphère, une baisse substantielle (26%) de la pluviométrie est aussi prévue par les modèles.

En conclusion

Les influences de la forêt sur le climat sont particulièrement nettes à l'échelle de la parcelle, c'est-à-dire au niveau microclimatique ; elles ont pu être largement établies et quantifiées en relation avec les caractéristiques architecturales des couverts. Ces influences sont si bien connues qu'elles peuvent être utilisées par le forestier pour améliorer les conditions de croissance des semis et des arbres et infléchir à son profit l'évolution naturelle des peuplements. Incontestablement en foresterie, une part importante de la technique est affaire de microclimat. Par contre à l'échelle locale et régionale, la mise en évidence des influences forestières est beaucoup moins facile et, en dehors de modifications majeures concernant plusieurs centaines de milliers d'hectares, il est difficile d'identifier des modifications climatiques.

Gilbert Aussenac,
INRA, Écophysiologie forestière, Équipe de Bioclimatologie et Écophysiologie
Président du centre de Recherches de Nancy,
54280 Champenoux ■

Pour en savoir plus

• G. Aussenac 1985 - Rôle de la microclimatologie et de la bioclimatologie en sylviculture. In : L'homme, la forêt et le bois. Revue du Palais de la Découverte, 13, 130, 151-166.
• G. Aussenac et J. Pardé 1985.- Forêts, climats et météores. Rev. For. Fra., XXXVII , n° sp., 83-104.

2 Les forêts face à l'augmentation du gaz carbonique dans l'atmosphère

L'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2, liée essentiellement à l'utilisation de combustibles fossiles par l'homme, constitue une composante majeure des changements environnementaux et climatiques globaux dont les risques sont maintenant très largement mesurés par la communauté internationale *.
Ainsi, les végétaux sont actuellement exposés à des niveaux de concentration en CO_2 atmosphérique, et également à une vitesse d'augmentation de cette concentration, jamais atteints au cours de leur histoire évolutive récente. L'accumulation de CO_2 et d'autres gaz à effet de serre pourrait également induire un réchauffement de 2 à 4 °C à la surface du globe, et modifier le régime des précipitations.
Face à ces changements, quelle est la situation des écosystèmes forestiers, qui représentent 26% de la surface des continents et près de la moitié de la surface de l'ensemble des couvertures végétales terrestres ?

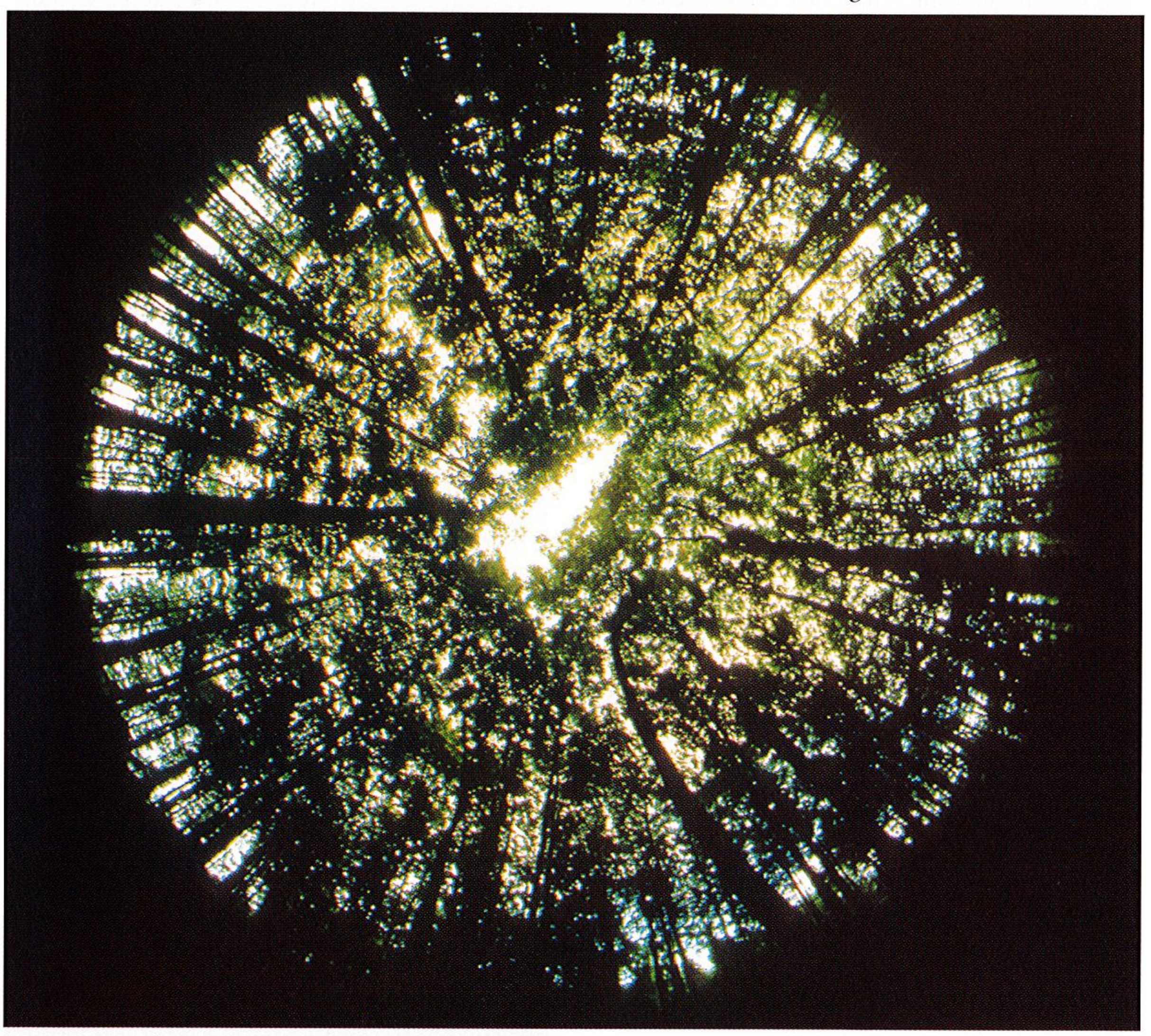


Photo : R. Canta

Voir aussi "La productivité des forêts en Europe s'accroît : une réalité aux conséquences considérables" page 65.

De ce point de vue les écosystèmes forestiers doivent être considérés sous deux aspects différents :

- comme une composante essentielle du cycle global du carbone, constituant un réservoir de carbone important, extrêmement mobile et interférant fortement avec le réservoir de CO_2 atmosphérique.

Selon les conditions environnementales (température, sécheresse), les écosystèmes forestiers peuvent constituer globalement un "puits" de C en assimilant de façon nette, des quantités importantes de CO_2 atmosphérique, ou au contraire constituer une "source" de CO_2 vers l'atmosphère.

Les écosystèmes forestiers sont-ils actuellement, et seront-ils dans les décennies à venir, "puits" ou "source" de CO_2 ? Une politique de reboisement généralisée pourrait-elle permettre de limiter l'augmentation du CO_2 atmosphérique par une augmentation de la "séquestration" de C dans la biomasse et les sols ?

- comme un système biologique répondant à l'augmentation du CO_2 atmosphérique et aux changements cli-

* La concentration atmosphérique en CO_2 a augmenté de façon quasi-exponentielle à partir d'une valeur de 270-280 vpm (volumes par million ou partie par million volumique) au début du siècle dernier jusqu'à un niveau actuel de 360 vpm.
Les simulations basées sur les scénarios d'émissions de CO_2 dans l'atmosphère les plus réalistes prévoient un doublement de la concentration en CO_2 par rapport au niveau préindustriel vers le milieu du siècle prochain.
La mesure rétrospective des concentrations en CO_2 permise par l'analyse des microbulles d'air contenues dans la glace polaire montre, qu'en dehors de l'influence humaine, la concentration atmosphérique en CO_2 a fluctué entre 200 et 280 vpm au cours des dernières 200 000 années.

matiques par des modifications de fonctionnement, de productivité, de structure et de répartition géographique potentielle des espèces.

La longévité des arbres est une caractéristique majeure à considérer dans l'analyse de ces réponses. L'échelle de temps des modifications environnementales en cours est précisément de l'ordre de grandeur de la durée de vie moyenne des arbres. Ce sont les jeunes arbres d'aujourd'hui, qui seront exposés aux concentrations en CO_2 élevées et aux conditions environnementales modifiées des décennies à venir. Par ailleurs, la vitesse élevée des changements climatiques ainsi que l'artificialisation du milieu interdira une réponse par adaptation génétique ou par migration des espèces, comme celles d'échelle millénaire, liées aux alternances glaciaires-interglaciaires. Les risques de dysfonctionnements et de dépérissements forestiers pourraient donc être accrus. En matière forestière, plus qu'ailleurs, il est nécessaire d'anticiper sur les modifications environnementales par un choix approprié des espèces et l'adaptation des règles sylvicoles. Les gestionnaires forestiers ont d'ailleurs parfaitement pris conscience de cette nécessité (Mortier 1995).

La recherche peut fournir des éléments d'aide à la décision par une description de la variabilité interspécifique de la réponse de la croissance à l'augmentation du CO_2 atmosphérique. Les espèces majeures de la forêt française répondront-elles de façon différentielle à l'augmentation du CO_2 atmosphérique ? Il est également crucial de mieux comprendre et modéliser les interactions entre l'augmentation du CO_2 atmosphérique et d'autres facteurs environnementaux tels la température, la sécheresse et les conditions de nutrition minérale.

À travers la description de travaux entrepris par notre unité dans le cadre de collaborations [1], nous faisons ici état des connaissances acquises, mais également des nombreuses interrogations qui subsistent, concernant ces deux aspects.

Rôle des écosystèmes forestiers dans le cycle global du carbone et l'évolution du CO_2 atmosphérique

Évolution du CO_2 atmosphérique, le "puits" de carbone lié aux écosystèmes terrestres

Depuis le début de l'ère industrielle 235 Gt [2] environ de carbone ont été émises dans l'atmosphère par l'utilisation de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz). Environ 165 Gt de carbone ont également été injectées

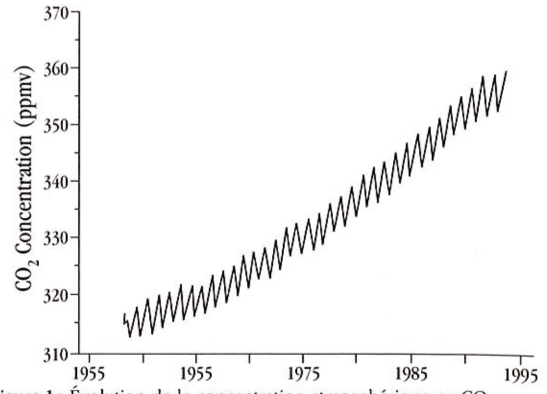


Figure 1 • Évolution de la concentration atmosphérique en CO_2 à l'observatoire de Mauna Loa (Hawaii). Les parties décroissantes de la courbe (été dans l'hémisphère nord) sont liées à l'absorption de CO_2 par la photosynthèse des couverts végétaux et par la dissolution dans les océans (données d'après Keeling et Whorf, 1994).

dans l'atmosphère du fait des déforestations, aboutissant à une combustion ou une oxydation accélérée de la matière organique contenue dans la biomasse ou dans les sols. L'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2 observée durant la même période correspond à l'accumulation d'environ 170 Gt de carbone dans l'atmosphère ; ce qui représente une quantité sensiblement inférieure à la valeur intégrée des émissions (235 Gt + 165 Gt).

Les taux actuels d'émission de carbone (sous forme de CO_2) dans l'atmosphère sont évalués à 5.4 Gt (combustibles fossiles) et environ 2.0 Gt (déforestation, essentiellement en zone tropicale) par an. L'accroissement annuel de la concentration atmosphérique en CO_2 est de 1.5 vpm, ce qui correspond à une augmentation de la masse totale de C atmosphérique de 3.4 milliards de tonnes.

Le bilan de carbone atmosphérique suggère donc que l'ensemble océans-biosphère terrestre a constitué, et constitue toujours, un "puits" de C absorbant actuellement près de 4 Gt de C par an. La contribution significative (ordre de grandeur de 2 Gt par an) de la biosphère terrestre à cet effet, et notamment le rôle des forêts, sont maintenant bien établis grâce à l'analyse fine et la modélisation des variations dans le temps et dans l'espace (à l'échelle planétaire) de la concentration (figure 1) et surtout de la composition isotopique (rapports $^{13}C/^{12}C$) du CO_2 atmosphérique [3].



Photo : Christophe Rose

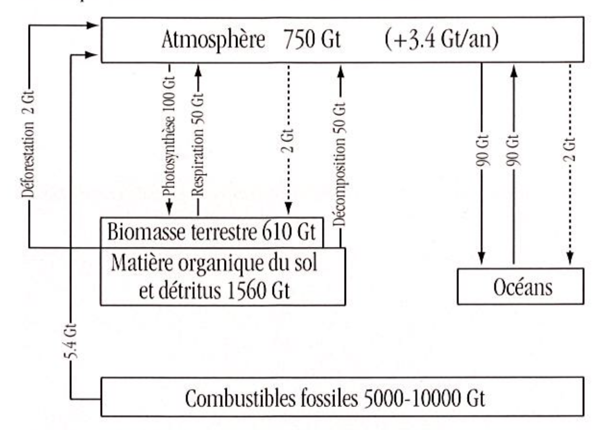
Chambre à ciel ouvert : mesures de CO_2.

1 Nationales ou internationales (programme AGROTECH-INRA, groupe français "Forêts Tempérées" du Programme International Geosphère-Biosphère, programmes communautaires).

2 1 Gt = 1 Gigatonne = 1 milliard de tonnes.

3 En effet les couvertures végétales se caractérisent par une discrimination isotopique importante contre le $^{13}CO_2$ lors de la photosynthèse, cependant que dans le cas de l'entrée du CO_2 dans les océans la discrimination isotopique est faible. L'analyse spatio-temporelle du signal isotopique atmosphérique fait ressortir l'existence d'un puits de C important dans la biosphère terrestre aux latitudes tempérées de l'hémisphère nord.

Figure 2• Réservoirs (en milliards de tonnes), flux (en milliards de tonnes par an). Les flux nets entre atmosphère et biosphère terrestre ou océans sont représentés en tiretés ; leur estimation est indépendante de celle des flux unidirectionnels.



L'existence actuelle de ce puits est vraisemblablement liée à deux facteurs. Le premier facteur est l'extension des surfaces forestières observée dans les pays industrialisés, essentiellement dans la zone tempérée de l'hémisphère nord (en France les surfaces forestières ont pratiquement été multipliées par deux depuis le début du 19ème siècle). Cela aboutit à une immobilisation importante de carbone, notamment sous forme de bois. Le second facteur est la stimulation de l'activité photosynthétique et de la productivité des couverts végétaux précisément liée à l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2 (on parle parfois de "fertilisation" par le CO_2, voir ci-dessous pour les processus) et, de façon plus hétérogène géographiquement, à une augmentation de la fertilité des sols par les émissions anthropogènes de composés azotés (voir aussi "évolution de la productivité des forêts en Europe").

Flux et réservoirs de carbone dans les écosystèmes forestiers

Par rapport à la taille des réservoirs de C des écosystèmes terrestres et de l'atmosphère, et surtout par rapport à la vitesse de variation du réservoir atmosphérique dans le temps, la biosphère terrestre et l'atmosphère échangent annuellement des quantités énormes de C dans les deux sens (figure 2). Le flux annuel de la fixation de CO_2 atmosphérique par la photosynthèse représente environ 100 Gt de C. Ce flux est quasiment compensé (à 2 Gt près) par un flux de CO_2 en sens inverse correspondant à la respiration des végétaux (environ 50 Gt par an) et des microorganismes du sol (bactéries, champignons...) qui décomposent la litière et la matière organique du sol (environ 50 Gt par an également). À partir de ces chiffres on conçoit aisément qu'une variation, même légère, dans un sens ou dans l'autre, de ces flux aurait un effet très sensible sur le bilan net des flux et donc sur la vitesse d'augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique. Un effet crucial à cet égard est la stimulation très sensible des processus respiratoires par l'augmentation de la température.

À l'échelle des différents écosystèmes, notamment forestiers, composant la couverture végétale terrestre (forêts tropicales humides, forêts tempérées, forêts boréales), les connaissances concernant le fonctionnement carboné restent encore très imparfaites. Or, ce type de données est extrêmement important pour la prévision des échanges de C entre les écosystèmes terrestres et l'atmosphère.

Au cours des dernières années, des développements méthodologiques considérables ont été réalisés dans les domaines microméteorologiques (méthode des corrélations turbulentes) et concernant le bilan isotopique des flux de carbone. Il est ainsi devenu possible d'évaluer de façon directe les flux de CO_2 à l'interface écosystème-atmosphère et à l'échelle infraécosystème, avec une résolution temporelle inférieure à la journée. L'utilisation de ces méthodologies, en conjonction avec l'étude de processus physiologiques et édaphiques clés, permet de progresser dans l'analyse du fonctionnement carboné des écosystèmes forestiers. Dans le cadre de collaborations nationales et internationales, notre laboratoire s'intéresse à une vaste palette d'écosystèmes forestiers [4]. L'objectif est d'analyser, et de modéliser en fonction des facteurs environnementaux, les différentes composantes (photosynthèse, respiration des arbres et du sol, recyclage du CO_2 d'origine respiratoire par la photosynthèse...) des flux nets de C entre les différents écosystèmes et l'atmosphère. Le but final est de prédire, grâce à la simulation par modèles mathématiques et par intégration spatiale, l'évolution globale de ces flux ainsi que celle des stocks de C immobilisés dans la biomasse et les sols [5].

Un niveau élevé et probablement durable de concentrations atmosphériques en CO_2

Dans l'attente de solutions énergétiques alternatives, il est vraisemblable que la majeure partie du stock de combustibles fossiles restant disponible sera utilisée au cours des décennies à venir. Suivant ce scénario, le flux total des émissions correspondrait à une quantité de carbone largement supérieure au réservoir atmosphérique actuel (figure 2). Même dans l'hypothèse de la mise en oeuvre de programmes de reboisement les plus volontaristes, associée à une augmentation de l'immobilisation de carbone par unité de surface (augmentation de la productivité nette des écosystèmes), l'ensemble des écosystèmes terrestres ne pourra pas absorber et immobiliser à long terme de telles quantités de C. À terme, seule l'absorption par les océans pourra contribuer à réduire le réservoir de CO_2 atmosphérique, et cette évolution se fera à l'échelle de plusieurs millénaires. De nombreuses générations futures d'arbres seront très vraisemblablement exposées à des concentrations atmosphériques en CO_2 supérieures au double du niveau préindustriel.

[4] En collaboration avec le laboratoire d'Écologie Végétale de l'Université d'Orsay et les laboratoires d'Écophysiologie et Nutrition Forestière, ainsi que de Bioclimatologie, de l'INRA de Bordeaux, notre laboratoire participe à plusieurs projets internationaux dans lesquels une série d'écosystèmes forestiers, couvrant un très large gradient latitudinal dans les domaines boréal, tempéré et tropical :
• le projet EUROFLUX, (Long term carbon dioxide and water vapor fluxes of European forests and interactions with the climate system) s'intégrant dans le programme ENVIRONNEMENT de l'Union Européenne et dans lequel les partenaires français s'intéressent d'une part à la hêtraie du plateau lorrain et d'autre part à la pinède landaise ;
• le projet nord-américain BOREAS (Boreal ecosystem-atmosphere study) auquel participent quelques équipes européennes ;
• en collaboration étroite avec l'unité de Recherches Forestières de l'INRA à Kourou, nous développons également un programme sur le fonctionnement carboné de la forêt tropicale humide guyanaise auquel participe aussi l'Université de Salt Lake City (Utah, USA).

[5] Ces recherches sont complémentaires des travaux de l'équipe Cycles Biogéochimiques et de l'équipe Phytoécologie du centre INRA de Nancy dont l'objectif est d'évaluer les impacts du type de sol et de la sylviculture sur les immobilisations et les flux de C dans l'écosystème forestier (Nys *et al* 1995). L'équipe Biologie du Sol du Centre d'Écologie Évolutive et Fonctionnelle de Montpellier (CNRS) mène, quant à elle, des travaux sur la réponse des processus de décomposition de la litière et de la matière organique du sol aux modifications environnementales.


Photo : C. Picon

Figure 3• Vue intérieure de mini-serre climatisée et régulée en CO_2, pin maritime et chêne pédonculé.

Effets de l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2 sur les arbres et des peuplements forestiers

Processus élémentaires et approche mise en oeuvre

La concentration atmosphérique en CO_2 affecte le fonctionnement des plantes de type métabolique C_3 [6] (dont tous les arbres font partie) par deux effets directs :

- une diminution de la conductance stomatique (un paramètre qui exprime le degré d'ouverture des stomates) qui a pour effet de diminuer à la fois le flux transpiratoire de vapeur d'eau sortant des feuilles, mais également le flux diffusif d'entrée de CO_2 dans la feuille ;
- une stimulation de la photosynthèse induite, malgré l'effet de réduction de la conductance stomatique, par une augmentation de la concentration en CO_2 à l'intérieur de la feuille.

Ces effets s'expriment de façon très variable en fonction des espèces (ou même au niveau intraspécifique) et des conditions environnementales et nutritionnelles, et peuvent même être inexistants dans certains cas.

Les recherches entreprises au cours des dernières années dans notre unité ont essentiellement porté sur l'analyse de la croissance et de ces déterminants physiologiques (photosynthèse, concentrations en sucres dans les différents tissus...) ainsi que sur la tolérance à la sécheresse [7]. Au plan expérimental, l'approche mise en oeuvre consiste à faire pousser des jeunes arbres soit sous conditions de CO_2 actuelles (360 vpm) soit à une concentration proche du double de la concentration actuelle (700 vpm) (figure 3).

La croissance des arbres et des peuplements

Les résultats obtenus sur différentes espèces font ressortir une augmentation moyenne de 46% de la croissance en biomasse avec le doublement de la concentration en CO_2 avec cependant des différences entre espèces. L'effet stimulant du CO_2 sur la croissance est moins sensible en conditions nutritionnelles ou hydriques limitantes, ce qui est le plus souvent le cas pour les forêts, qu'en conditions optimales.

Un résultat original de nos travaux consiste en la mise en évidence, pour les chênes sessile et pédonculé, d'un effet du CO_2 sur la morphogenèse (accélération de la formation des pousses, augmentation du nombre moyen de pousses ainsi que du nombre de feuilles par pousse, augmentation de la taille moyenne d'une feuille (figure 4). Ces observations suggèrent que la réponse de la croissance est déterminée par la capacité d'utilisation du carbone par la plante plutôt que par la capacité d'acquisition photosynthétique du carbone. Cette dernière est en effet modulée, dans une large mesure, par la vitesse de croissance de la plante.

Les différences interspécifiques dans la stimulation de la croissance par l'augmentation du CO_2 sont-elles associées à des différences de plasticité des processus morphogénétiques face à l'augmentation du CO_2 et *in fine* au type de croissance (croissance déterminée ou indéterminée, monocyclique ou polycyclique) [8] ?

En termes de dynamique des peuplements, les résultats obtenus permettent de **prédire une accélération de la croissance initiale dont le résultat majeur pourrait être une diminution du temps nécessaire pour la fermeture des couverts**. Cette conclusion est importante au plan du fonctionnement des peuplements et des écosystèmes et incite à penser qu'il sera nécessaire dans l'avenir de modifier les règles de conduite des peuplements (par exemple éclaircies plus précoces). Cependant, les résultats obtenus jusqu'ici ne permettent guère de prédire les modifications du fonctionnement des peuplements après la fermeture des couverts, qui précisément constitue la phase la plus importante vis-à-vis de la production de bois. Les expérimentations programmées, impliquant des couverts denses fermés de jeunes arbres (jusqu'à 4-5 ans) croissant en conditions de compétition interspécifique, devraient fournir des informations précieuses à cet égard.

Transpiration et tolérance à la sécheresse

Les interactions entre augmentation du CO_2 atmosphérique et tolérance à la sécheresse sont essentielles dans le contexte des changements globaux.

Les questions abordées sont les suivantes :

[6] Pour ces plantes la première molécule formée après la réduction du CO_2 comprend trois atomes de C. Dans le cas des plantes en C_4 (par exemple le maïs) il s'agit d'une molécule à quatre atomes de C. La photosynthèse des plantes de type métabolique C_4 ne répond pratiquement pas à l'augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique, cependant il semble que l'effet de fermeture stomatique puisse exister.

[7] Ces recherches sont complémentaires des travaux sur le métabolisme du carbone menés par l'unité d'Écophysiologie Cellulaire de l'Université Henri Poincaré Nancy I.

[8] Cette hypothèse sera testée, dans le cadre d'un criblage des espèces forestières européennes majeures, en collaboration avec le Laboratoire d'Écologie Végétale de l'Université d'Orsay.



Figure 4• Effets d'un doublement du CO_2 atmosphérique sur des semis de chêne pédonculé. 700 vpm à gauche, 350 vpm à droite.

• la fermeture stomatique partielle induite par l'augmentation du CO_2 amène-t-elle effectivement une réduction des pertes d'eau et une amélioration de l'état hydrique des arbres ? Cet effet est-il variable en fonction des espèces ? Des effets de compensation liés à l'intégration des processus à l'échelle du couvert (structure du couvert et quantité de feuillage, microclimat) peuvent-ils intervenir ?

• les effets positifs de l'augmentation du CO_2 sur la régulation stomatique et l'efficience d'utilisation de l'eau (rapport photosynthèse/transpiration) peuvent-ils être contrebalancés par des effets de second ordre (par exemple liés à une modification de l'allocation de C dans la plante) affectant d'autres composantes de la tolérance à la sécheresse telles la structure des conduits xylémiens qui détermine l'efficience du transfert de l'eau dans l'arbre, l'osmorégulation ou le statut mycorhyzien des racines ? [9]

Ces travaux sont effectués d'une part sur le pin maritime, espèce "évitante" par rapport à la sécheresse caractérisée par une très grande sensibilité stomatique vis-à-vis des contraintes hydriques, et, d'autre part sur les chênes (sessile, pédonculé et plus ponctuellement chêne liège), espèces "tolérantes" dont la sensibilité stomatique est moins importante. Dans ces deux groupes d'espèces, l'adaptation à la sécheresse met en oeuvre des mécanismes différents. Elle pourrait donc être affectée de façon différentielle par l'augmentation du CO_2 atmosphérique. Cette hypothèse est confirmée par les résultats concernant le fonctionnement stomatique en situation de sécheresse. La sensibilité stomatique à la sécheresse du pin n'est pas modifiée, cependant que celle du chêne pédonculé est augmentée. Il reste maintenant à déterminer si cette différence est extrapolable à l'ensemble des espèces "évitantes" et "tolérantes" et à achever l'analyse de l'ensemble des composantes de la tolérance à la sécheresse.

9 Collaboration avec l'équipe de Microbiologie Forestière de Nancy.

Conclusions

Par l'augmentation de la quantité de carbone qu'ils immobilisent, les écosystèmes terrestres et notamment forestiers ont joué, et jouent toujours, un rôle important d'atténuation de l'augmentation du CO_2 atmosphérique induite par les activités humaines. Cependant il n'est pas certain que cet effet reste efficace dans les décennies à venir. En tout état de cause, si les émissions de CO_2 liées aux activités humaines restent importantes dans le futur, les écosystèmes forestiers ne permettront pas d'éviter une augmentation très sensible, et de longue durée, de la concentration atmosphérique en CO_2.

Concernant la prévision des impacts de l'augmentation du CO_2 atmosphérique sur les arbres et les peuplements forestiers, il est nécessaire de poursuivre les recherches sur la variabilité interspécifique de la réponse de la croissance, de la tolérance à la sécheresse ou à d'autres contraintes du milieu. Il s'agit maintenant de déterminer les traits morphogénétiques et physiologiques permettant, pour chacune des caractéristiques considérées, de classer les espèces en différents groupes fonctionnels.

Un second axe de recherche que nous privilégions pour les années à venir concerne l'intégration de la réponse des arbres à l'échelle de l'écosystème (relations plante-atmosphère, plante-sol et également plante-plante). Dans cet objectif, les interactions carbone-azote-eau seront analysées aux différentes échelles d'intégration fonctionnelle (cellule, plante, écosystème) dans des mini-écosystèmes reconstitués. L'analyse des flux de C, N et H_2O à ces différentes échelles sera largement basée sur l'utilisation des méthodologies isotopiques stables. L'accent sera mis notamment sur la modification des entrées de carbone dans le sol (exsudations, mortalité des fines racines, litière) et les conséquences pour l'acquisition des ressources minérales.

Enfin, il conviendrait de prendre en compte les effets de l'augmentation du CO_2 atmosphérique sur la composition biochimique et la qualité du bois.

La construction très prochaine à Nancy de serres de grande taille conditionnées en CO_2 et dans lesquelles le climat extérieur sera reproduit, constitue un atout majeur pour la progression dans ces voies de recherche.

Jean-Marc Guehl,
INRA, Écophysiologie forestière,
Équipe Bioclimatologie et Écophysiologie,
Centre de Recherches de Nancy, 54280 Champenoux ■

Pour en savoir plus

• CD Keeling, TP Whorf 1994. Atmospheric CO_2 records from sites in the SIO air sampling network. In : TA Boden, DP Kaiser, RJ Sepanski, FW Stoss (eds), Trends 93 : A compendium of data on global change, ORNL/CDIAC, Oak Ridge National Laboratory, Oak ridge Tennessee, USA, 16-26.
• Mortier F. 1995. Le CO_2 et la forêt. Bulletin Technique de l'ONF 29, 159 p.
• C. Nys, Jl Dupouey, J. Balesdent, 1995. Cycle du carbone dans l'écosytème forestier. Impact du milieu et de la sylviculture sur les immobilisations et les flux. Dossier de l'Environnement de l'INRA 10, 49-55.
• C. Picon, JM Guehl, G. Aussenac 1996. Growth dynamics, transpiration and water-use efficiency in Quercus robur plants submitted to elevated CO_2 and drought. Annales des sciences forestières 53, 431-446.
• P. Vivin, JM Guehl, A. Clément, G. Aussenac, 1996. The effects of elevated CO_2 and water stress on whole plant CO_2 exchange, carbon allocation and osmoregulation in Quercus robur seedlings. Annales des sciences forestières 53, 447-449.

3 Forêts et eaux : relations entre écosystèmes forestiers et ressources en eau

Les forêts, par les influences qu'elles exercent sur le cycle hydrologique, conditionnent en quantité et qualité les ressources en eau des bassins versants. En fait, le rôle hydrologique de la forêt ne peut pas être envisagé en bloc : son influence dépend du sol et du climat : régime et importance des précipitations, pouvoir évaporant de l'air ; en effet l'importance et la répartition des précipitations sont les facteurs décisifs qui règlent, avec la température, l'existence des forêts et des types auxquels elles se rattachent. On estime d'ailleurs qu'à l'échelle de la terre, les zones occupées par les forêts reçoivent en moyenne deux fois plus d'eau que les autres types d'occupation des sols.

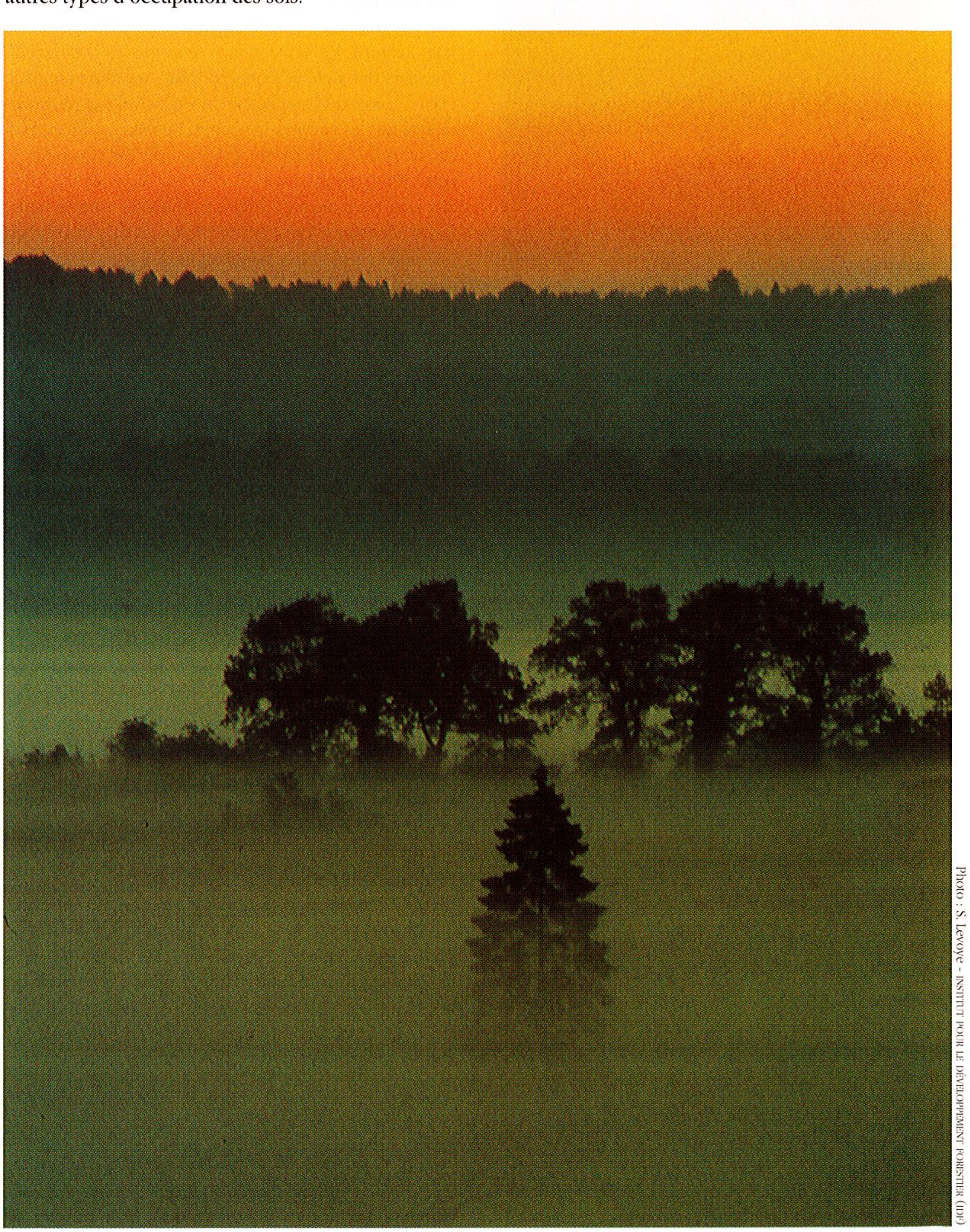


Photo : S. Levoye - INSTITUT POUR LE DÉVELOPPEMENT FORESTIER (IDF)

L'existence de ces nombreuses composantes, et en conséquence la difficulté d'identifier clairement le rôle de la forêt, explique l'existence des controverses qui se sont développées dès le siècle dernier en Europe et en Amérique du Nord ; malgré des données expérimentales insuffisantes, l'idée que les forêts amélioraient les ressources en eau et avaient un rôle modérateur des crues s'est imposée à beaucoup d'aménagistes. Les progrès importants de l'hydrologie forestière des vingt cinq dernières années apportent sur cette question des réponses plus claires, encore que des résultats contradictoires et des difficultés de mesure de certaines variables rendent difficile une interprétation indiscutable des influences de la forêt sur les ressources en eau.

Influence de la forêt sur l'importance et le régime des précipitations

Des expériences réalisées à la fin du siècle dernier notamment à Nancy ont accrédité l'idée que les forêts augmentaient notablement (18%) les précipitations à l'échelle régionale. En réalité l'influence de la forêt sur l'importance des précipitations tombant sur une région est difficile à mettre en évidence en raison de la complexité des rapports entre d'une part sites boisés et sites non boisés et d'autre part entre surfaces océaniques et continents ; aussi pour effectuer des comparaisons valables, il est nécessaire de se placer dans des conditions topographiques et géographiques semblables, conditions qui sont difficilement réalisables. Ainsi, en ce qui concerne les expériences réalisées à Nancy, les différences d'altitude et d'exposition aux vents dominants suffisent à expliquer le surplus de pluviométrie mesuré en forêt de Haye par rapport aux zones agricoles à l'est de Nancy.

De fait, il apparaît maintenant que les effets de la forêt concerneraient plus particulièrement les phénomènes orageux de caractère convectif en périodes estivales.

À l'heure actuelle, il n'existe pas à ce propos de données fiables sur les dimensions minimales que doit avoir un massif forestier pour exercer un effet significatif au plan énergétique et hydrique sur l'atmosphère environnante. Il est probable que plusieurs centaines d'ha d'un seul tenant sont nécessaires. L'effet de très nombreux petits massifs séparés par des zones découvertes est encore plus mal connu. Malgré ces incertitudes on admet maintenant pour les **régions tempérées**, un surplus de l'ordre de 1 à 2% de pluviométrie annuelle pour les grandes zones boisées par rapport aux régions agricoles.

Dans le cas des **forêts tropicales humides** affectées par des déboisements de très grande ampleur, un certain nombre d'études ont été réalisées ; c'est ainsi qu'une possible réduction des précipitations dans le nord (zone soudanienne) de la Côte d'Ivoire a été mise en relation avec une baisse de l'évapotranspiration liée à la diminution des surfaces forestières dans la partie sud de ce pays (forêt dense humide). En effet les modifications entraînées par les feux de brousse et par l'installation de cultures annuelles sur de très grandes superficies, ont pour conséquence de réduire les apports de vapeur d'eau à l'atmosphère comparativement aux formations forestières fermées à pouvoir transpiratoire élevé et forte capacité d'interception des précipitations. Par ailleurs l'absence de végétation active (sol nu ou jachère) a pour conséquence une injection importante d'énergie calorifique dans l'atmosphère qui se traduit par une augmentation de la température de l'air et du sol et qui perturbe les mécanismes de formation des nuages. Finalement il en résulterait une moindre pluviosité dans les zones éloignées de la mer ; de fait il s'agit là de "preuves" indirectes qui ne garantissent aucunement l'explication de l'origine des baisses pluviométriques concernées.

En Amazonie, les effets possibles de la déforestation totale (pâturages sur sols dégradés) sur les précipitations de cette région ont été étudiés par simulation en utilisant un modèle numérique de fonctionnement de l'atmosphère et de la biosphère. Les résultats de cette simulation font apparaître, liés à une baisse de l'évapotranspiration, une augmentation de la température de l'air et du sol de l'ordre de 1 à 3° C dans le cas de la déforestation et une baisse de la pluviométrie annuelle voisine de 26 %, couplée à une augmentation de la durée de la saison sèche. Cette étude concerne le cas extrême d'une déforestation totale d'une immense zone géographique sur la base d'une absence totale de reconstitution de la forêt (sols dégradés et couverture végétale basse et discontinue) or malgré une baisse, la pluviométrie moyenne prévue par le modèle resterait élevée (1821 mm) et serait donc susceptible de permettre une reconstitution d'une végétation forestière sans doute floristiquement différente de la végétation originelle mais capable d'avoir une évapotranspiration importante. Par ailleurs ce modèle concerne l'ensemble du bassin amazonien et une extrapolation de ces résultats à des surfaces plus limitées doit être envisagée avec précaution.

Le cycle de l'eau en forêt

Influence de la forêt sur les précipitations

Les précipitations liquides ou solides qui tombent sur le couvert forestier sont promises à des destinées

diverses ; une partie est interceptée par les surfaces végétales qui constituent l'écosystème forestier (peuplement principal, sous-étage, strate arbustive et strate herbacée, litière). Le reste arrive au sol soit directement par égouttement des surfaces végétales, soit par écoulement le long des troncs. Une fraction de l'eau qui arrive au sol peut ruisseler en surface. La fraction restante s'infiltre dans le sol où, en relation avec les caractéristiques de pente, de structure et de texture, elle peut circuler par écoulement hypodermique. Le surplus d'eau percole et alimente les nappes souterraines et les fleuves. Dans le sol, l'eau est absorbée par les racines des végétaux et retourne dans l'atmosphère par transpiration ; elle est aussi évaporée directement à partir du sol et des surfaces végétales inertes.

L'interception des précipitations par le couvert constitue une influence majeure de la forêt sur le cycle de l'eau. En effet pour les peuplements à couvert fermé, elle représente une fraction importante des précipitations annuelles : 25 à 50% chez les résineux et 15 à 30% chez les feuillus. Dans les forêts tropicales, les pourcentages d'interception sont variables et souvent plus faibles qu'en région tempérée, notamment pour les forêts des zones tropicales humides. L'interception qui en valeur relative, diminue avec l'importance des précipitations, dépend de l'intensité de la pluie, de son caractère continu ou intermittent et du pouvoir évaporant de l'air ; pour une même hauteur d'eau tombant sur un peuplement, l'interception est plus forte quand la pluie est constituée de petites averses intermittentes que lorsqu'il s'agit de précipitations fortes et continues. En effet pendant les interruptions, l'eau interceptée s'évapore rapidement et le couvert est à nouveau susceptible de stocker les précipitations. En fait la capacité maximum de stockage des précipitations par le couvert est faible et ne dépasse pas 3 mm ; le rôle de réservoir joué par le couvert forestier est donc très faible lorsque les précipitations sont continues et très importantes.

L'interception augmente avec **l'âge et la densité du peuplement** : par exemple chez le hêtre dès 50 ans l'interception annuelle atteint 20% et augmente jusqu'à 25% à 120 ans ; chez le douglas, en raison d'un couvert très important, l'interception est déjà très élevée (35%) à l'âge de 15 ans. L'ouverture du couvert par éclaircie entraîne une diminution de l'interception, mais pas dans les mêmes proportions. Ainsi, dans un peuplement de douglas, enlever la moitié des arbres n'entraîne qu'une diminution de 17% de l'interception car l'ouverture du couvert facilite le mouillage des couronnes et permet une évaporation plus rapide de l'eau interceptée. L'eau interceptée est dans sa plus grande partie évaporée. Alors que l'évaporation de l'eau interceptée par les prairies entraîne une réduction de la transpiration correspondant à 100% de l'interception, on admet qu'en climat tempéré, la perte globale atteint 80-85% de l'eau interceptée par les couverts forestiers.

Dans les régions à **brouillards fréquents**, zones côtières ou montagneuses, la forêt peut condenser de 30 à 50% de plus que le terrain découvert. Dans certains cas même (Californie, Hawaï, Tchécoslovaquie) à cause des condensations de brouillard, il n'y a pas de perte par interception. La condensation des brouillards dans les forêts de montagne influe donc sur le bilan hydrique plus qu'en plaine.

En dehors des brouillards, on peut observer la nuit la **formation de rosée** lorsque la température de l'air s'abaisse en dessous de la température du point de rosée. La rosée est un gain pour la forêt si l'eau condensée provient de la masse d'air atmosphérique mais dans bien des cas, il semble que la rosée ait en partie pour origine, l'eau provenant de l'écosystème. On estime que sur une surface horizontale la hauteur maximum de rosée qui peut se former avec une gamme de température comprise entre 0 et 20°C, est de l'ordre de 0,07mm.h^{-1} ; les hauteurs d'eau relevées en fin de nuit sont de l'ordre de 0,2 à 0,5 mm. La rosée est donc une composante mineure du cycle hydrologique.

Le couvert forestier influence fortement la répartition et l'accumulation de **la neige** qui à cause de sa légèreté, est très sensible à la rugosité du substrat sur lequel elle tombe. Alors que pour la pluie ce sont les forces de tension superficielles qui déterminent l'interception, la fixation des flocons est liée à leur état physique. Les résineux à couvert dense (sapin, épicéa, douglas) interceptent le maximum, les feuillus beaucoup moins. Certaines espèces ou écotypes d'altitude ou des régions boréales ont développé des formes columnaires qui interceptent de faibles quantités de neige. Les conséquences du stockage de la neige sur les couronnes sont controversées car il est difficile d'évaluer les pertes par évaporation. La fonte de la neige est plus lente en forêt qu'en terrain nu, avec pour conséquence une durée plus longue du manteau neigeux qui peut persister jusqu'à 3 semaines de plus en forêt qu'en terrain découvert. La mise en évidence de ce phénomène a permis de développer des techniques d'aménagement permettant de contrôler la durée de la couche neigeuse et de mieux répartir la disponibilité en eau en aval.

Influence de la forêt sur l'eau dans le sol

L'eau, qui arrive à la surface du sol peut, en dehors des phénomènes d'évaporation, être évacuée par ruissellement superficiel, écoulement hypodermique, infiltration et stockage dans le sol, écoulement profond.



Photo : A. Campana

Le ruissellement dépend de l'importance des précipitations, de la topographie du terrain et de la capacité d'infiltration du sol.

L'écoulement hypodermique correspond à un écoulement latéral dans les couches supérieures du sol. L'importance de cette fraction dépend essentiellement de la structure du sol (plus ou moins perméable) ; un horizon imperméable à faible profondeur favorise ce type d'écoulement qui peut atteindre, dans certains cas, 80% du débit total.

La capacité **d'infiltration** (mm.h^{-1}) est une propriété dynamique : élevée au début d'une averse, elle diminue avec le développement de l'averse (augmentation de taille des colloïdes du sol qui réduit la taille des pores, écoulement des éléments fins dans les pores). Les sols forestiers ont en général une capacité d'infiltration plus grande que les sols nus car, d'une part, la litière diminue l'effet mécanique des gouttes d'eau qui tend à détruire la structure du sol en surface en favorisant les phénomènes de battance (colmatage des pores par les éléments fins) et d'autre part, l'activité des différents organismes vivants(microorganismes, animaux, racines) a pour effet d'augmenter la porosité du sol et de stabiliser sa structure. Cette capacité d'infiltration peut être diminuée par des travaux de débardage ou les feux. On admet que la capacité d'infiltration s'accroît du sol nu → cultures → prairies → forêt. Les humus forestiers présentent une bonne perméabilité qui cependant, varie beaucoup avec leur degré initial d'humidité. Ainsi, après une longue période de sécheresse les humus bruts (résineux) sont très hydrophobes et constituent pour les premières précipitations une couche imperméable ; à l'état humide, ils retiennent beaucoup d'eau alors que les humus doux (feuillus) interceptent beaucoup moins.

Dans le sol la quantité d'eau maximale (mm. m^{-1} de sol) **utilisable** (réserve utile) pour la transpiration dépend de sa texture et de sa profondeur (75 mm pour un sable et 170 mm pour un limon argileux). En fait, au fur et à mesure de l'épuisement de la réserve utile les arbres ont des difficultés à extraire l'eau du sol et réduisent leur transpiration dès que 60% de la réserve utile ont été épuisés. La profondeur de prélèvement de l'eau correspond à la profondeur d'enracinement, en dehors des remontées capillaires difficiles à quantifier. Les prélèvements d'eau sont initialement les plus importants dans les couches superficielles, les réserves plus profondes sont progressivement consommées par les arbres au fur et à mesure du dessèchement.

L'écoulement des crues dépend en premier lieu des conditions climatiques et des caractéristiques géomorphologiques. Mais comparativement à des sols dénudés à capacité d'infiltration faible favorisant les ruissellements de surface, les forêts limitent l'importance des crues et retardent le moment de leur occurrence. L'influence du couvert forestier (interception et capacité élevée d'infiltration de l'eau dans le sol) reste très limitée pour les crues résultant d'un ruissellement hypodermique et lorsque, à la suite de précipitations prolongées et très importantes, la capacité de stockage du bassin de drainage est largement dépassée. De fait l'effet le plus important de la forêt réside probablement dans sa capacité de limitation des phénomènes d'érosion et donc de l'importance des sédiments qui augmentent le volume et la puissance des crues. Un cas un peu particulier concerne les couverts arborés discontinus tels les bocages ; des études réalisées en Bretagne montrent qu'en pays bocager les crues sont en moyenne une à deux fois moins fortes qu'en terrain dégagé ; cependant

ici encore subsistent de nombreuses incertitudes liées aux conditions climatiques d'établissement des crues.

L'évapotranspiration des forêts

L'évapotranspiration qui représente la consommation en eau d'un couvert forestier englobe la transpiration des végétaux, l'évaporation du sol et de l'eau de pluie interceptée par les feuilles qui par exemple pour un peuplement de pin sylvestre représentent respectivement 54.1%, 6.5% et 39.4% de l'évapotranspiration totale annuelle. L'évapotranspiration est sous la dépendance de différents facteurs du climat : le rayonnement solaire, la température, l'humidité de l'air et la vitesse du vent. Pour les couverts forestiers de type "rugueux" (forêts de conifères), chez qui les phénomènes d'échange turbulents sont très efficaces (couplage entre couvert et atmosphère), existent de bonnes corrélations entre transpiration et déficit de saturation de l'air. Au contraire, dans le cas de couverts de feuillus, le rayonnement solaire apparaît prépondérant (découplage).

L'estimation directe de l'évapotranspiration des forêts est particulièrement difficile en raison des dimensions, de la longévité et de l'enracinement profond des arbres. Elle peut être déterminée directement à partir de profils microclimatiques au-dessus du couvert ou indirectement à partir de l'équation générale du bilan hydrique à l'échelle de la parcelle et à l'échelle des bassins versants. La quantité d'eau en surplus qui s'écoule peut ainsi être calculée par différence entre précipitations et évapotranspiration, ou être mesurée au niveau des ruisseaux exutoires des bassins versants.

Influence de la densité des peuplements

Dans des conditions de sol et de climat déterminées, l'évapotranspiration est maximale (et donc l'écoulement minimum) lorsque le couvert est fermé ; en effet, dans ce cas l'interception et la transpiration sont elles aussi maximales. L'enlèvement total ou partiel du couvert se traduit par une baisse de l'évapotranspiration, avec pour conséquence une augmentation de la teneur en eau du sol et, selon les cas, une augmentation de l'écoulement. L'augmentation de l'écoulement dans les bassins versants dépend de l'importance des précipitations : ainsi par exemple aux USA dans les régions à précipitations comprises entre 1200 et 2300 mm, l'accroissement d'écoulement résultant d'une coupe rase varie de 130 mm à 460 mm ; dans les régions à précipitations plus faibles et comprises entre 530 et 710 mm, l'écoulement n'augmente que de 25 à 75 mm. Enfin, dans les zones à précipitations inférieures à 480 mm, pas d'augmentation de l'écoulement. En Lorraine, on a observé une diminution de l'évapotranspiration de 29% après une coupe rase. La durée de la période d'augmentation de l'écoulement dépend de l'importance de l'accroissement initial après la coupe, du type et de l'importance de cette dernière et de la vitesse de reconstitution du couvert. Par opposition aux coupes totales ou partielles, les éclaircies ont un effet beaucoup plus transitoire, car le couvert se referme vite et les racines des arbres recolonisent rapidement le sol disponible. Ainsi dans un peuplement de douglas de 19 ans en Lorraine, il a été observé que l'effet d'une éclaircie forte (50% de surface terrière [1]) disparaissait au bout de 5 ans.

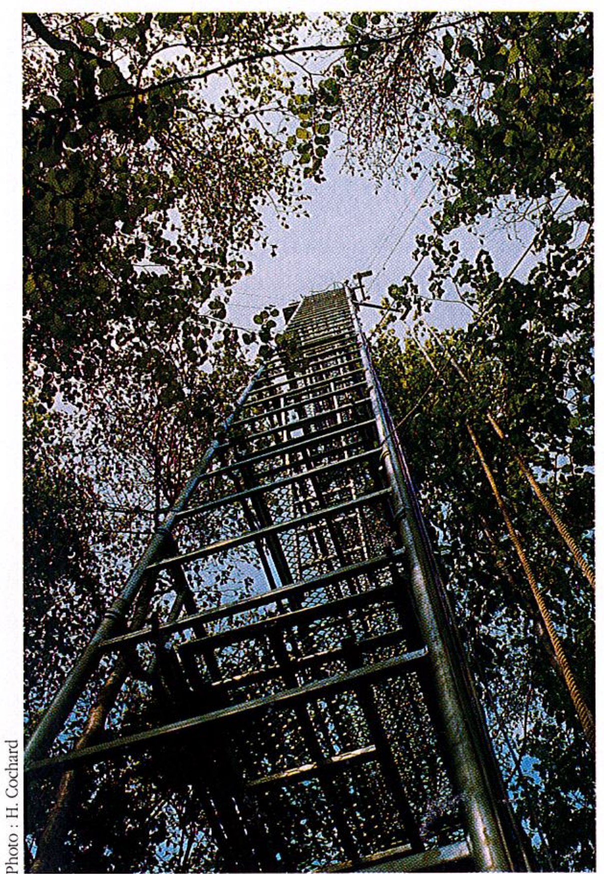
[1] Surface cumulée/ha des sections des troncs d'arbres (section à 1,30 m).

Influence de l'espèce et de l'âge des peuplements

Il y a lieu de distinguer l'évapotranspiration totale des peuplements de la transpiration des arbres des différentes espèces. En effet, selon qu'il s'agit d'espèces à couvert dense ou clair, le sous-bois sera développé ou non. Dans le premier cas, la transpiration des arbres représentera pratiquement l'évapotranspiration totale du peuplement ; dans le deuxième cas, le rôle du sous-bois sera important comme dans le cas du pin maritime dans les Landes. Chez cette espèce la transpiration des arbres dépend étroitement du degré d'ouverture des stomates, de l'indice foliaire et du déficit de saturation de l'air ; la transpiration du sous-bois herbacé (molinie) est très liée au rayonnement solaire reçu par les feuilles et représente globalement 25% de l'évapotranspiration totale quand le sol est bien pourvu en eau, alors qu'en conditions de sécheresse elle dépasse celle des arbres.

En Lorraine la comparaison de l'évapotranspiration de 4 peuplements pendant la période de végétation aboutit au classement suivant par ordre décroissant : hêtre, sapin de Vancouver, pin sylvestre, épicéa commun. D'une façon générale, on peut admettre que, pendant la saison de végétation, les peuplements feuillus évapotranspirent autant ou plus que les peuplements résineux ; par contre, c'est le contraire pendant la période fin automne-hiver et début printemps car à ce moment l'interception est beaucoup plus élevée chez les résineux et l'efficacité transpiratoire des feuillus est réduite.

Avec l'âge les peuplements présentent des modifications importantes dans leur biomasse, mais aussi dans leur structure. D'une façon générale, la strate herbacée et arbustive est importante au début de la vie des peuplements, puis diminue lorsque le couvert principal se ferme et enfin réaugmente quand le peuplement vieillit et s'éclaircit. Ces transformations entraînent des variations de l'évapotranspiration qui sont la conséquence des modifications de la transpiration des végétaux, de


Photo : H. Cochard

Mesure de la transpiration d'un peuplement.

l'évaporation du sol et de l'interception. L'évapotranspiration des peuplements passe par un maximum, et donc l'écoulement par un minimum, qui se situe selon les peuplements entre 40 ans et 60 ans .

L'évapotranspiration des forêts comparée à celle des prairies

L'évapotranspiration des forêts est plus élevée que celle des formations basses de type prairie par exemple. Selon les cas, le rapport évapotranspiration prairie/évapotranspiration forêt varie de 0,9 en climat humide à 0,7 dans les climats à déficits hydriques importants. Lorsque le déficit hydrique augmente, la forêt consomme notablement plus que la prairie en raison d'un enracinement plus profond capable d'exploiter complètement les réserves hydriques du sol. Pour un déficit hydrique extrême, l'avantage d'un système racinaire plus puissant disparaît car les précipitations très faibles ne peuvent réhydrater profondément le sol.

Influence de la forêt sur la qualité des eaux

L'influence de la forêt sur la qualité des eaux des ruisseaux et rivières est difficile à définir dans la mesure où d'autres facteurs interviennent aussi : notamment le type de sol et les apports atmosphériques. Il apparaît cependant que par rapport aux prairies et aux espèces forestières feuillues, les résineux produisent une litière plus acidifiante et constituent, par leurs surfaces foliaires persistantes et généralement plus importantes, un piège plus efficace pour les polluants atmosphériques (azote et soufre notamment). À cet égard on doit signaler que les forêts fixent dans leur biomasse les apports azotés et il semble que les bandes boisées le long des cours d'eau abaissent les teneurs en nitrates des nappes alluviales. Dans plusieurs études, il a été observé des différences de composition chimique des eaux s'écoulant de bassins versants occupés par des prairies, des peuplements forestiers feuillus et des peuplements résineux. Ces différences sont liées à une érosion chimique plus importante chez les résineux, notamment l'épicea. Il apparaît maintenant que sur des sols chimiquement pauvres les enrésinements massifs et une sylviculture intensive (exportations importantes d'éléments minéraux) pourront induire une acidification des eaux préjudiciable à la vie de certaines espèces comme les salmonidés.

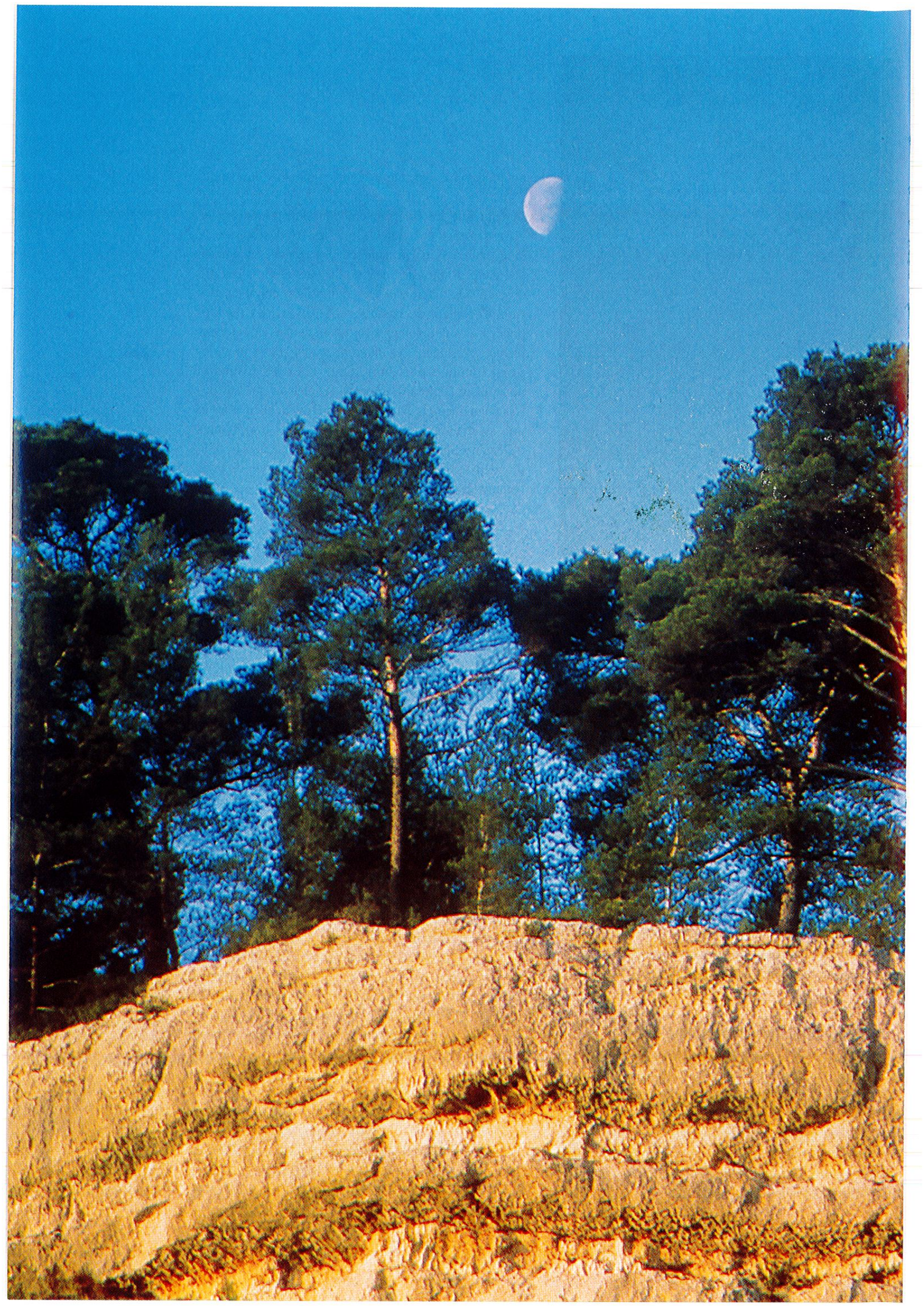
En conclusion

Les influences de la forêt sur les ressources en eau sont complexes et diverses car dépendantes du climat, des conditions de sol, et des activités humaines. On peut cependant dire que les forêts à couverts fermés ont un pouvoir d'évapotranspiration plus élevé que les autres formations végétales et qu'à ce titre et en raison d'une forte capacité d'absorption des précipitations par leurs sols, elle jouent un rôle déterminant sur l'étalement des écoulements dans les rivières. La réduction de l'importance du couvert forestier par des coupes (éclaircies ou coupes rases) permet de moduler la consommation en eau et donc l'écoulement dans les bassins versants. En ce qui concerne les comparaisons entre feuillus et résineux, les différences de consommation en eau ne sont pas aussi grandes qu'on l'a cru et peuvent même être inversées selon les types de peuplement. Au plan de la qualité des eaux, il apparaît que les résineux induisant une érosion chimique plus importante que les feuillus et les prairies, conduisent à une augmentation de l'acidité de l'eau s'écoulant dans les bassins versants. En conclusion, on peut dire que malgré des progrès récents, des incertitudes encore nombreuses persistent dans la compréhension du fonctionnement hydrique et hydrologique des peuplements et des bassins versants forestiers et nécessitent encore des travaux de recherche.

Gilbert Aussenac,
INRA, Écophysiologie forestière,
Équipe de Bioclimatologie et Écophysiologie,
Président du centre de Recherches de Nancy,
54280 Champenoux ■

Pour en savoir plus

• G. Aussenac 1980.- Le cycle hydrologique en forêt. In : Actualités d'Écologie forestière, Gauthiers-Villard, 283-307.
• G. Aussenac, A. Granier, et N. Breda 1995. Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. Rev. For. Fra. XL VII, 1, 54-62.
• J. Humbert, G. Najjar 1992- Influence de la forêt sur le cycle de l'eau en domaine tempéré. Une analyse de la littérature francophone. 85 p Centre d'études et de recherches Éco-géographiques URA 95 CNRS. Strasbourg.




Pin d'alep. Photo : © R. Schiano - CEMAGREF

Les forêts et leurs sols

Les sols des écosystèmes forestiers constituent une composante particulièrement importante où interviennent des processus physiques et biologiques majeurs parmi lesquels le cycle du carbone et des éléments minéraux, fortement liés au turn-over de la matière organique. Les recherches menées à la suite des phénomènes de dépérissement observés au début des années 80 ont montré que la connaissance du fonctionnement des sols en relation avec leurs caractéristiques propres, la sylviculture pratiquée, les facteurs anthropiques (dépôts azotés, dépôts acides, ...) était essentielle pour comprendre la stabilité ou l'instabilité des écosystèmes forestiers. Corrélativement, assurer un niveau suffisant de nutrition minérale des arbres, du semis à l'arbre adulte par voie physique et biologique (micro-organismes symbiotiques de la rhizosphère) est aussi l'un des moyens de cette stabilité.

Garantir sur le long terme la fertilité des sols et la nutrition minérale des arbres et des peuplements représente donc réellement l'un des piliers d'une gestion forestière durable et un enjeu majeur pour les chercheurs. La question est encore plus pertinente dans le contexte d'un climat en évolution ou d'une intensification de la sylviculture (variétés plus productives) dont il faut s'efforcer de prévoir les conséquences.

1 La fertilité des sols des forêts est-elle durable ?

Le souci de maintenir, voire d'améliorer, le niveau de fertilité des sols forestiers n'est pas récent puisque Grandeau (1879), Sabatier, (1890) ou Henry (1908) l'avaient déjà dès la fin du XIX[e] siècle. Ce paramètre n'a pourtant pas retenu l'attention du sylviculteur comme cela a été le cas pour l'agriculteur.

Il y a à cela un certain nombre de raisons et il est vraisemblable que la frugalité légendaire des peuplements forestiers, la longévité et la rusticité des essences, l'exploitation relativement extensive de la ressource, ont contribué à différer la prise en compte de ce paramètre. Ceci est quelque peu contradictoire dans un pays de forte tradition sylvicole.

L'intensification de la sylviculture conduit cependant à poser très sérieusement la question du caractère durable d'une telle gestion.



Photo : M. Pitsch

On ne pourra réaliser de gestion durable que lorsque tous les paramètres-clés du fonctionnement des écosystèmes seront connus. Les facteurs de la production soutenue font partie de ces paramètres mais ce ne sont pas les seuls, puisqu'il faut prendre en compte les diverses fonctions de l'écosystème, en particulier celles qui concernent le maintien de la qualité de l'environnement (qualité des sols, des eaux de surface, diversité biologique, paysage, ...).

La gestion durable ne sera envisagée ici que pour le seul paramètre "fertilité du sol".

La question à laquelle il faut répondre est celle du caractère renouvelable de la ressource "sol". Il apparaît que ce n'est que dans un passé récent, exacerbé au moment des dépérissements forestiers des années 80, que l'on a pris conscience du fait que le sol n'est pas une ressource renouvelable. Quel que soit l'aménagement mis en œuvre, voire le non aménagement, le sol va évoluer en perdant plus ou moins rapidement de sa fertilité initiale.

Ces pertes s'accélèrent avec la demande à l'écosystème ou si des contraintes externes apparaissent subitement (pollution diffuse et *a fortiori* aiguë, par exemple). En effet, le développement de la végétation, le drainage de solutions même diluées, les récoltes, les régénérations, conduisent à des pertes d'éléments voire de matière (érosion) qui ont un caractère irréversible. L'importance des pertes varie avec l'intensité des sollicitations vis-à-vis des écosystèmes et la perte de fertilité bien qu'inéluctable n'entraîne que des déperditions généralement lentes du potentiel de production, bien évidemment plus sensibles quand les réserves initiales du sol sont limitées.

La gestion durable va donc consister à faire que ces pertes soient le plus limitées possibles ou qu'elles soient compensées. Les lois classiques de l'agronomie s'appliquent à la foresterie.
Les gestionnaires vont surtout s'intéresser au maintien de la production du système ; ce qui n'est pas obligatoirement synonyme de maintien de la fertilité du sol, qui s'entend ici comme un critère absolu ; on peut en effet substituer aux essences présentes de nouvelles essences moins exigeantes qui produisent autant, voire plus de biomasse, y compris dans le cadre d'une fertilité ayant diminué.
La stratégie consistera d'abord à raisonner dans un contexte de foresterie extensive en adaptant l'aménagement aux contraintes du milieu. La pression d'intensification sera raisonnée en fonction de paramètres divers incluant nécessairement l'environnement.

Le concept de fertilité du sol

Le concept de fertilité mérite une définition assez précise de sorte que les critères d'une gestion respectant cette fertilité puissent être identifiés à partir des études d'impact de diverses pratiques sylvicoles en fonction des conditions de milieu.
La fertilité "native" d'un sol correspond à une somme de facteurs physiques, physico-chimiques, chimiques et biologiques déterminant son aptitude à soutenir une production. Ces diverses composantes ne sont séparées que pour des raisons didactiques, mais sont en réalité en forte interaction.
Cette définition sous-entend que seul le sol est en cause, dans des conditions climatiques fixes par ailleurs, ce qui n'est pas absolu. En effet, la fertilité du sol représente une ressource potentielle qui sera utilisée de manière spécifique par le peuplement végétal considéré. Le rôle du sylviculteur est également à prendre en compte : plantations réalisées avec des essences souvent allochtones, traitements sylvicoles favorisant une essence particulière ou prélèvements de litière effectués dans le passé en forêt au profit des terres cultivées.
Le paramètre "fertilité minérale" du sol sera surtout abordé ici ; il a deux composantes :
• la fertilité actuelle
• la fertilité à moyen et long terme.

La fertilité actuelle est une donnée statique déterminée à partir des analyses de sol. La fertilité à long terme est une donnée dynamique correspondant au flux d'éléments libéré lentement par l'altération des minéraux du sol au cours de réactions de neutralisation de l'acidité apportée ou générée par voie interne (prélèvement de cations, nitrification, réactions d'oxydation). Ce flux va recharger le facteur "pool disponible" du sol.
Ceci est vrai pour tous les éléments y compris l'azote qui a un comportement assez voisin des autres éléments dans les écosystèmes sans fixateur d'azote atmosphérique, bien que cet élément n'existe pas dans les roches mères.

Les méthodes utilisées

• **La fertilité actuelle** : les méthodes pour déterminer la fraction disponible des éléments pour la végétation prennent en compte les éléments échangeables (cations de type Ca, Mg, K, ...) et le phosphore dit assimilable, c'est-à-dire extraits par des réactifs relativement doux, libérant la partie labile des composés organiques et minéraux et l'azote minéral produit instantanément ou cumulé pour la période annuelle de végétation.
Ces méthodes extraient des composés dont on connaît "bien" les caractéristiques physico-chimiques et pour lesquels on fait l'hypothèse que les plantes sont susceptibles de les prélever. Il y a une grande nuance entre ces deux termes, et en fonction des types de sols, la disponibilité réelle pour le végétal pourra être très variable. Des abaques permettent d'effectuer un diagnostic de l'état actuel de la fertilité du sol.
Ces analyses expriment un potentiel encore assez éloigné de ce qu'est le milieu réel dans lequel les plantes puisent leurs éléments nutritifs. Concrètement, la solution du sol est un milieu dilué, y compris au voisinage des racines, de force ionique beaucoup plus faible que celle utilisée dans les analyses classiques. Son équilibre physico-chimique avec la phase solide du sol va conduire à des rapports entre éléments notablement différents de ceux obtenus avec des solutions concentrées.
On peut donc penser que les méthodes de détermination de la fertilité actuelle des sols, bien que très largement utilisées, ne sont pas complètement satisfaisantes et qu'il serait intéressant de tester d'autres méthodes se rapprochant plus de la réalité des conditions d'alimentation à l'interface sol-plante.
• **La fertilité minérale à moyen et long termes** : le flux d'altération issu des minéraux des sols est un paramètre beaucoup plus difficile à mesurer que le précédent ; c'est pourtant le seul intéressant pour caractériser la résilience [1] des systèmes extensifs, dans lesquels il compense majoritairement l'épuisement des réserves actuelles par les cultures.
Beaucoup d'approches indirectes ont été utilisées pour quantifier ce paramètre :
- bilans sur la phase solide du sol faisant intervenir l'âge du sol et une référence initiale, supposant la linéarité du phénomène,

[1] Capacité de résistance aux contraintes.

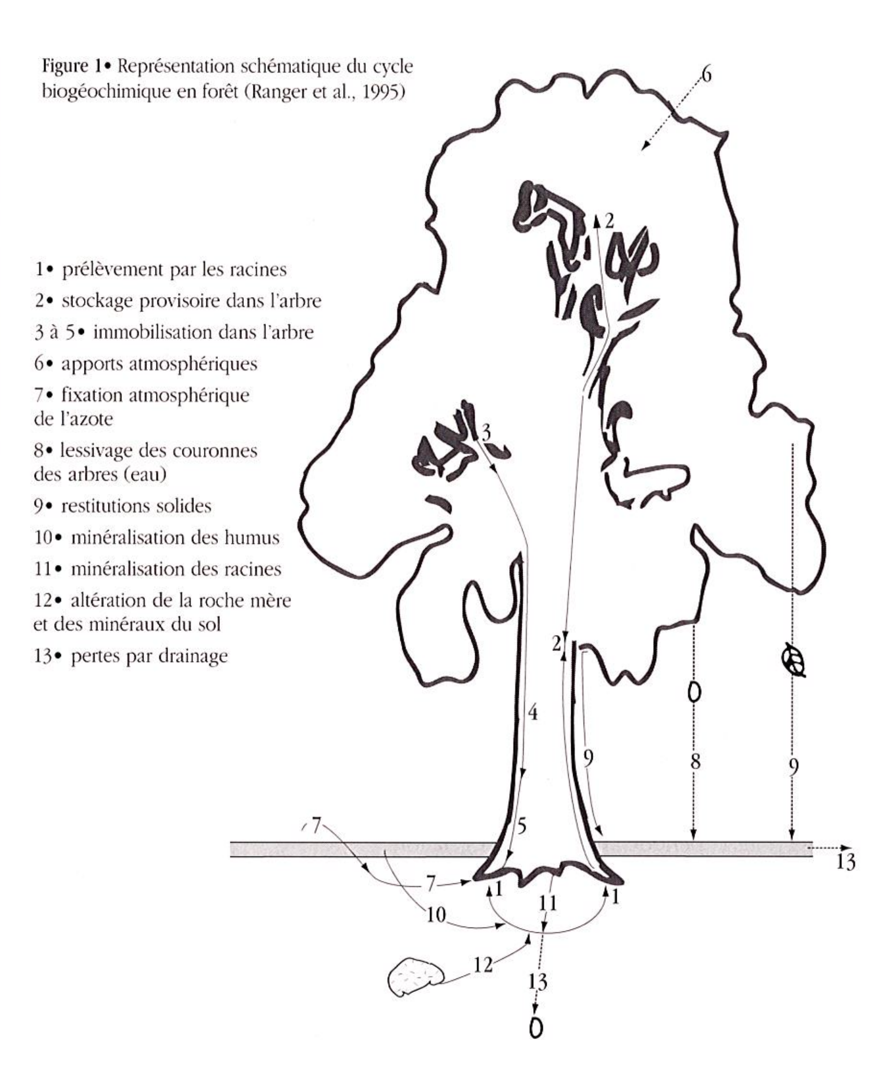


Figure 1• Représentation schématique du cycle biogéochimique en forêt (Ranger et al., 1995)

- bilans d'écosystèmes où tous les termes sont connus sauf l'altération, faisant l'hypothèse de la stabilité du système,
- expérimentation en conditions contrôlées et tentative d'extrapolation aux conditions naturelles.

L'information issue des bilans d'écosystèmes permet de fixer l'ordre de grandeur du flux d'altération, nécessaire au maintien en l'état du système. Cette approche ne permet cependant pas d'identifier l'origine exacte des éléments, en particulier la part issue du flux d'altération des minéraux de celle issue de la désaturation éventuelle du complexe absorbant du sol ou de la déstabilisation du compartiment organique. En termes de fonctionnement, la différence entre ces origines est très importante puisque la désaturation conduit à un changement d'équilibre du système qui risque de se traduire rapidement par une baisse de pH et une aluminisation du complexe absorbant, avec toutes les conséquences possibles sur la biologie et la production de l'écosystème. À l'inverse, quand les pertes de cations sont compensées par le flux d'altération des minéraux, certes le pouvoir tampon du sol diminue, c'est-à-dire sa fertilité à moyen et long termes, mais la biologie du système n'est pas affectée car le pH et la saturation ne changent pas.

Des bilans entrées-sorties corrects ne peuvent être établis que si l'on peut avoir une évaluation indépendante de tous les termes du bilan et en particulier du flux d'altération.

La démarche en cours de validation consiste à établir des bilans entrées-sorties précis, à mesurer la désaturation du complexe absorbant du sol, à caractériser la stabilité du compartiment organique, à localiser les éléments nutritifs dans les phases minérales, à identifier les réactions d'altération actuelles puis à modéliser les flux en fonction des paramètres physiques des sols.
C'est donc une méthode lourde applicable seulement dans des sites où toutes les données de base sont connues. Réalisée sur un grand nombre de sites, elle devrait pouvoir être rapportée à des invariants autorisant des extrapolations.

Le problème spécifique de l'alimentation minérale des peuplements forestiers

Les forêts sont caractérisées par des essences longévives, rustiques (sans amélioration génétique importante) et situées sur des sols dont les réserves minérales sont limitées (sols anciens sans enrichissement, sols délaissés par l'agriculture vivrière).
Dans ces conditions, un ensemble de mécanismes adaptatifs se sont mis en place, conduisant à des performances très intéressantes de ces végétaux au plan de leur efficience globale dans l'utilisation des éléments nutritifs pour produire de la biomasse végétale. Les besoins en nutriments des forêts pour élaborer leur biomasse annuelle sont importants et même parfois étonnamment élevés, mais un ensemble de mécanismes de recyclage dans l'écosystème conduit à l'optimisation de l'utilisation du stock disponible : c'est le cycle biologique ou biogéochimique des éléments nutritifs qui est schématisé dans la figure 1.

L'observation de nombreux écosystèmes dans le cadre de programmes divers, mais en particulier du Programme Biologique International (PBI) a permis de brosser les grands traits du fonctionnement du cycle biogéochimique des éléments nutritifs.

• Les besoins pour l'élaboration de la biomasse d'un peuplement sont élevés
• L'origine des éléments caractérise les plantes pérennes : une partie est prélevée au sol et une partie provient d'un recyclage interne à la plante d'éléments provenant des tissus âgés drainés vers les organes en croissance. Certains éléments sont fortement recyclés par cette voie (parfois 50 % des besoins totaux) comme N, P ou K ; le calcium ne l'est pratiquement pas
• La partie des éléments prélevés au sol qui lui est restituée (entre 50 et 80 %) est très importante via les litières en particulier
• Les restitutions sous forme essentiellement organique constituent un pool inutilisable par les plantes : la minéralisation des litières est donc capitale

Dispositif d'étude du fonctionnement d'un écosystème forestier.



Photo : Dominique Gelhaye

• Les apports externes participent au maintien de la fertilité mais sont, pour partie, perdus par drainage (partie des apports réalisée hors saison de végétation)

• La soustraction réelle au sol est constituée par l'immobilisation dans les parties ligneuses, le stockage dans la biomasse foliaire stable, l'accumulation dans la litière au sol

• Les pertes définitives au sol sont constituées par les éléments exportés lors des récoltes et par les pertes par drainage (pendant la révolution et lors de la phase de récolte-régénération).

Les différents stades de développement d'un peuplement correspondent à des schémas sensiblement différents dans la mesure où chaque tranche d'âge du peuplement correspond à des demandes parfois spécifiques (NPK = éléments de jeunesse) et à des modifications quantitatives très importantes de la demande.

Le cycle biologique a au moins deux rôles :

• le premier, qui vient d'être décrit, conduit à l'optimisation de l'utilisation d'un pool actif mais quantitativement limité,

• le second se traduit par une opposition très efficace à l'entraînement vers la profondeur des éléments nutritifs tels le calcium et le magnésium. Dans les sols acides ces éléments sont inéluctablement entraînés hors du profil radiculaire dans la mesure où la compétition avec l'aluminium leur est défavorable pour se maintenir sur le complexe absorbant du sol.

Comment mettre en évidence le caractère conservatoire ou non de la gestion forestière

Le seul moyen est l'établissement de bilans de fertilité minérale du sol sur une ou mieux plusieurs révolutions forestières dans des sites observatoires suffisamment nombreux, prenant en compte la variabilité des situations écologiques.

La pérennité d'un écosystème repose sur la stabilité du cycle biogéochimique des éléments qui doit se traduire par des bilans entrées-sorties équilibrés, au moins sur le moyen terme.

• à l'échelle du sol : il est possible de traiter par le même principe théorique les cations et le phosphore présents dans la roche mère et l'azote dont l'origine est initialement atmosphérique. On peut s'adresser aux éléments totaux, mais habituellement on ne prend en compte que le compartiment "éléments assimilables", qui représente la fertilité actuelle.

À partir d'un modèle conceptuel dit à compartiment et à flux (Ranger et Bonneau, 1984) on peut formuler de la façon suivante la variation du stock (Δ S) d'éléments minéraux disponibles pour les plantes pendant une révolution forestière :

Δ S = apports externes + altération - drainage
- immobilisation ± variation du stock d'humus

• à l'échelle de l'écosystème :

ENTRÉES	=	SORTIES
apports atmosphériques		exportations dans la biomasse
+		+
éléments issus de l'altération		pertes par drainage pendant le cycle sylvicole
		+
		pertes par drainage pendant la coupe

Ce bilan entrées-sorties permet de vérifier si la pérennité de la production peut raisonnablement être espérée. Dans le cas de déséquilibre important, la différence doit être apportée en fertilisation. Les problèmes qualitatifs sont beaucoup plus complexes. En effet une immobilisation dans le système (par exemple si la litière se décompose mal) ne se traduit pas par un déficit au niveau du bilan, mais il s'agit cependant d'une perte pour le pool des éléments disponibles pour les plantes. Ces bilans sont très utiles mais on conçoit leur limite. Le déséquilibre du bilan peut avoir des origines diverses qu'il est impératif d'analyser.

Les bilans peuvent être établis pour un stade particulier de développement de l'écosystème, mais ils prennent cependant tout leur intérêt quand ils sont établis pour une révolution complète. La longévité des essences forestières est évidemment un obstacle majeur. Faute de dispositifs de suivi à long terme, l'approche la plus souvent utilisée est celle de la chronoséquence de peuplements qui permet par extrapolation, à partir de quelques peuplements d'âges différents situés dans des conditions écologiquement aussi comparables que pos-

sible, d'obtenir rapidement des données pour une révolution complète.

La mise en place de dispositifs d'observation et de manipulation d'écosystèmes pouvant être gérés à long terme est une priorité. La mise en place du réseau RENECOFOR, géré par l'Office National des Forêts, témoigne de l'intérêt porté à ce problème et fournira des références dans le domaine.

Le concept de "révolution forestière écologique" : les conséquences pour la gestion durable

Présenté par Kimmins, ce concept consiste pour un site donné (écologie et aménagements fixés) à effectuer un bilan et à voir quel est le laps de temps nécessaire pour que le système revienne aux conditions d'avant la récolte par compensation des pertes d'une phase juvénile (forte immobilisation) par une phase de sénilité (faible immobilisation permettant une recharge en éléments assimilables à partir de l'altération). Cette définition est liée à celle du caractère renouvelable ou non de la ressource, qui est un concept non pas strictement biologique, mais économique : si la longueur du cycle de renouvellement écologique n'est pas réaliste économiquement, la ressource est alors non renouvelable ; elle l'est dans le cas contraire.

Nous étions partis sur une définition apparemment différente qui considère que la ressource s'épuise inéluctablement et a, par conséquent, un caractère non renouvelable. Kimmins prend en compte la seule fertilité actuelle qui, dans les sols riches, se reconstitue rapidement par altération des réserves. Cette position est surtout contestable par les ambiguïtés qu'elle peut générer, car même dans les sols forestiers les plus riches il n'est pas évident qu'une intensification maximum de la demande ne conduise pas relativement rapidement à des contraintes de disponibilité des éléments nutritifs (cas des taillis à courte rotation par exemple). Il est plus rationnel de considérer un gradient de richesse de sol et de définir les problèmes inhérents à quelques grandes subdivisions.

On pourrait ainsi définir 3 cas :

1• les sols les plus riches où la gestion durable est possible

2• les sols pour lesquels cette gestion nécessite des aménagements très spécifiques

3• les sols où cette gestion n'est pas réellement possible car la phase de reconstitution est très lente. La gestion ne pourrait se faire que sur le très long terme avec des phases d'exploitation minière et des phases de type jachère. Une autre solution étant un enrichissement artificiel du site.

Il n'est pas toujours facile de savoir dans quelle situation l'on se trouve. En effet, il est vraisemblable que beaucoup de plantations se développent correctement en amputant le capital disponible. La production y est alors soutenue mais la gestion de l'écosystème n'est pas durable. Les plantations résineuses sont souvent récentes et seules 2 à 3 générations ont été récoltées. Aucune donnée n'est en général disponible sur l'état initial du sol. De plus, les conditions externes peuvent compliquer l'analyse, comme c'est le cas pour les apports d'azote qui augmentent la production mais conduisent souvent à une désaturation du sol.

Impact des aménagements forestiers sur la fertilité du sol

Les effets de la sylviculture vont porter :

• sur les exportations d'éléments par les récoltes qui dépendent essentiellement de l'espèce végétale, de l'âge d'exploitation, de l'intensité de la récolte et de la classe de production ;

• sur les exportations d'éléments nutritifs par le drainage hors de la zone racinaire comprenant :

- le drainage profond existant pendant toute la vie du peuplement, qui est principalement fonction du climat, de l'espèce, du traitement sylvicole et du stade de développement du peuplement,
- le drainage exceptionnel d'éléments pendant la phase de récolte, en particulier lors des coupes à blanc ;

• sur l'effet de la préparation des sites sur le stock d'éléments nutritifs. Il s'agit du débardage des bois qui peut entraîner un tassement du sol, de l'andainage [2] qui peut conduire à une perte de fertilité importante si les horizons superficiels sont décapés, de l'incinération des rémanents d'exploitation.

La figure 2 fait la synthèse des résultats de l'intensification de la sylviculture sur la demande en azote ; l'allure des courbes rend compte de la disproportionalité entre taux de récolte de biomasse et taux d'exportation d'azote.

En conclusion

Le fonctionnement minéral d'un écosystème forestier est très spécifique et se résume dans le concept du cycle biogéochimique des éléments nutritifs :

[2] Rassemblement des déchets d'exploitation (rémanents) en lignes (andain) à l'aide d'un tracteur spécialement équipé.

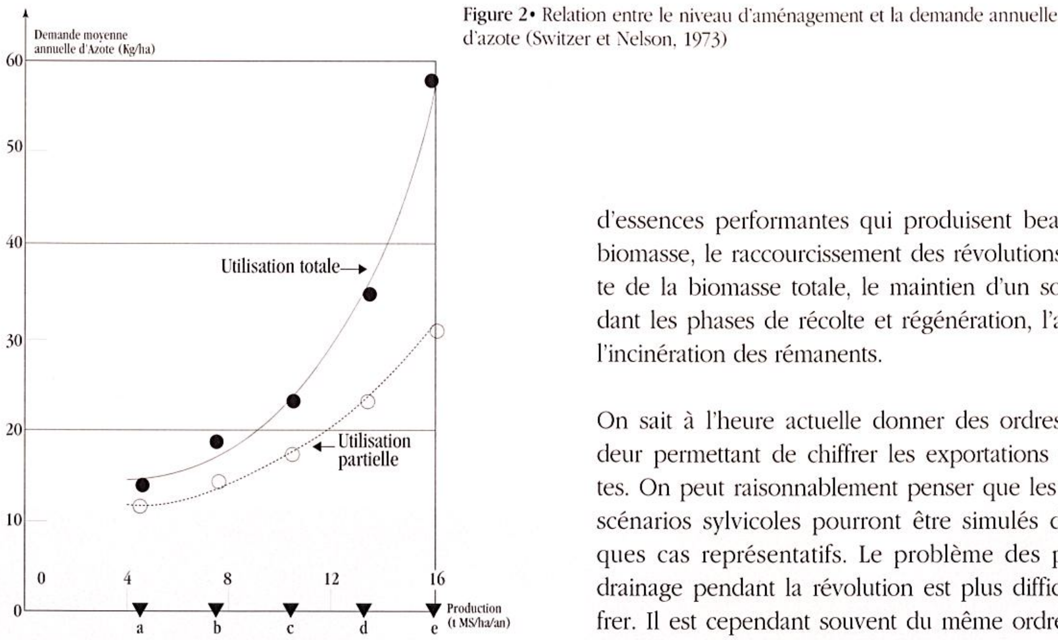


Figure 2• Relation entre le niveau d'aménagement et la demande annuelle d'azote (Switzer et Nelson, 1973)

a : peuplement naturel de 40 ans
b : peuplement naturel de 20 ans
c : peuplement naturel de 10 ans
d : rotation courte (10 ans) + sélection génétique + travail du sol
e : d + fertilisation pour atteindre le potentiel maximum de l'espèce.

• ce fonctionnement est très conservatif pour la fertilité naturelle du sol, puisque, par les restitutions organiques, les éléments nutritifs prélevés sur tout le profil pédologique sont restitués essentiellement à la surface du sol, qu'il s'agisse des litières aériennes ou même racinaires ;
• grâce à ce mécanisme, une production importante est réalisée à partir de réserves souvent limitées.

Il existe pour tout type d'écosystème une longueur de révolution correspondant à la révolution écologique qui peut dans les sols les plus pauvres n'avoir aucun réalisme économique. Il faudrait être capable pour tous les écosystèmes de pouvoir identifier cette longueur de révolution, c'est-à-dire de pouvoir généraliser des bilans fiables.

La gestion doit prendre en compte la fertilité du sol en considérant que le sol n'est pas une ressource renouvelable mais un capital acquis qu'il est impératif de préserver. Il s'agit des éléments nutritifs mais peut-être surtout du stock organique du sol : la matière organique est un réservoir de cations, un échangeur d'ions très puissant qui va retenir les éléments nutritifs à la partie supérieure du sol ; elle participe à la qualité de la structure physique du sol donc à l'aération et à la réserve en eau. Les lois de gestion sont celles de l'agronomie classique.

Toutes les décisions d'aménagement conduisant à des exportations supplémentaires d'éléments nutritifs risquant de diminuer le stock organique du sol ou conduisant à des contraintes physiques sont à raisonner en fonction de la fertilité du sol. Ce sont : l'introduction d'essences performantes qui produisent beaucoup de biomasse, le raccourcissement des révolutions, la récolte de la biomasse totale, le maintien d'un sol nu pendant les phases de récolte et régénération, l'andainage, l'incinération des rémanents.

On sait à l'heure actuelle donner des ordres de grandeur permettant de chiffrer les exportations des récoltes. On peut raisonnablement penser que les effets des scénarios sylvicoles pourront être simulés dans quelques cas représentatifs. Le problème des pertes par drainage pendant la révolution est plus difficile à chiffrer. Il est cependant souvent du même ordre de grandeur que les pertes occasionnées par les récoltes (sauf pour le phosphore). Les bilans établis sur quelques écosystèmes commencent à donner des indications mais la diversité est trop importante pour généraliser les conclusions. La modélisation devrait être utilisable à cet effet.

Un point capital non résolu est le suivant : connaissant parfaitement les contraintes appliquées à un système, quelles vont être les conséquences pour l'avenir de la production ? Quels sont les indicateurs de la déstabilisation lente d'un écosystème et par conséquent quels sont les indicateurs du bon fonctionnement ? Comment arriver à déterminer sur des bases objectives la "charge critique totale tolérable par un écosystème forestier" ?

Les études approfondies des mécanismes du fonctionnement biominéral du système (dynamique de la matière organique, de l'azote et des cations) et les expérimentations à long terme, correctement menées, sont les seuls éléments susceptibles de permettre d'établir des corrélations entre les contraintes et la réponse du système et de valider des modèles de fonctionnement. Il faudrait pouvoir disposer de données sur plusieurs révolutions forestières pour arriver à des conclusions non spéculatives. Très rares sont les expériences à long terme pensées dans cette optique dès leur mise en place.

La gestion durable doit prendre en compte les relations entre les écosystèmes. En particulier, le fonctionnement des écosystèmes forestiers peut faire peser une contrainte sur l'écosystème aquatique : l'acidification des sols peut entraîner celle des ruisseaux ou des lacs, de même à l'inverse l'apport d'engrais peut conduire à leur eutrophisation.

Jacques Ranger,
INRA, Équipe Cycles biogéochimiques,
Centre de Recherches de Nancy,
54280 Champenoux ■

Pour en savoir plus

• M. Bonneau, 1995 : Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. publication ENGREF. 367p.
• J.P. Kimmins, 1974 : Sustained yield, timber monitoring, and the concept of ecological rotation ; a British Columbian view. Forest Chronicle. february 1974 : 27-31.
• J. Ranger & M. Bonneau, 1984 : Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. Le cycle biologique en forêt. Rev. For. Fr., XXXVI, 2 : 93-112.

2 Assurer une bonne nutrition minérale des arbres, condition d'une forêt durable

Différents processus métaboliques déterminent la croissance des arbres et la production de bois : la fixation du carbone atmosphérique par photosynthèse au niveau des feuilles, son intégration dans des molécules organiques, le transport de ces molécules, la multiplication et la croissance cellulaire. Les substances végétales synthétisées comportent, outre le carbone provenant de l'air, l'oxygène et l'hydrogène provenant de l'eau, des éléments minéraux que les arbres ne peuvent trouver que dans le sol. Par ordre d'abondance décroissante dans les tissus foliaires, ce sont essentiellement l'azote, le potassium, le calcium , le soufre, le phosphore et le magnésium. De plus, les réactions enzymatiques conduisant à la synthèse des molécules organiques nécessitent la présence de ces mêmes éléments.

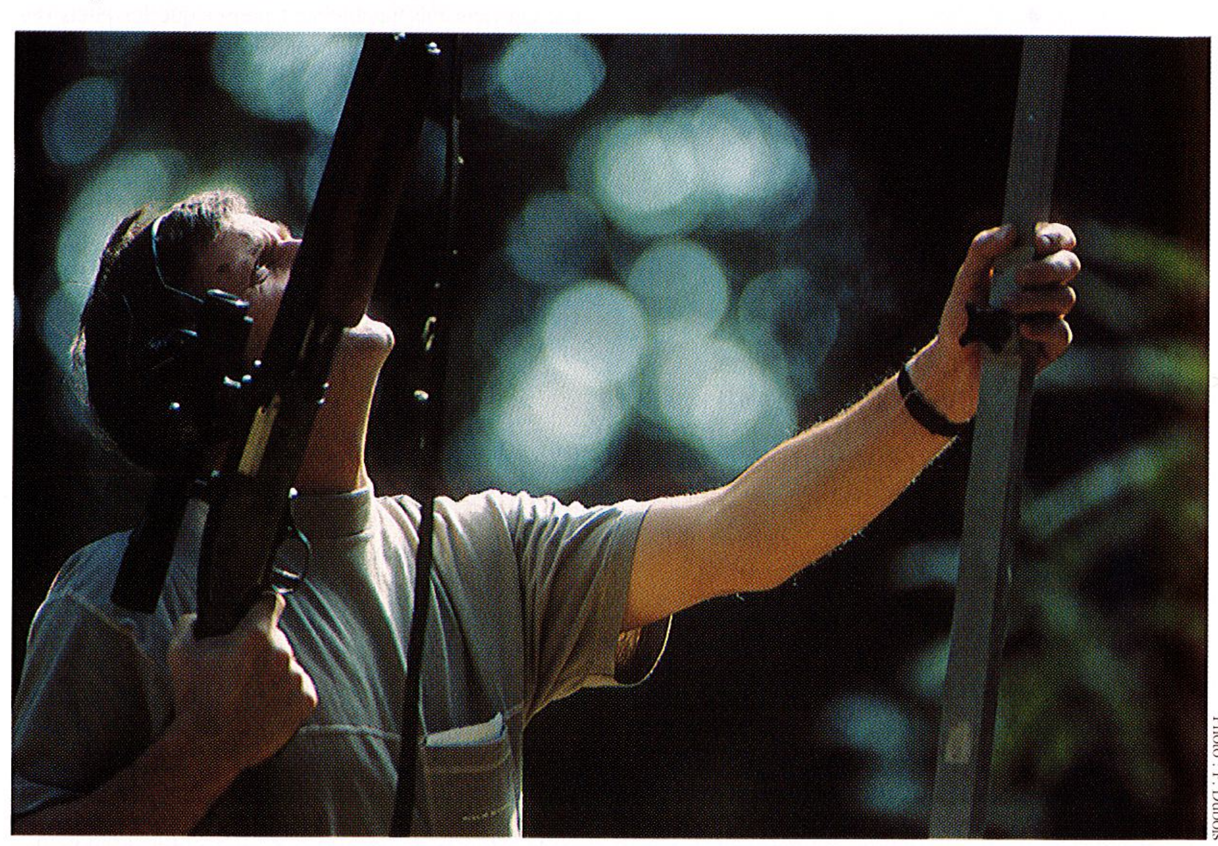


Photo : P. Dubois

Photo 1 • Prélèvement de feuilles au fusil en vue de l'analyse foliaire.

L'abondance et la disponibilité de ces éléments dans le sol conditionnent la nutrition minérale des arbres et leur croissance. Dans le cadre d'un bilan minéral équilibré, les arbres doivent pouvoir prélever et stocker dans leurs organes les quantités d'éléments nutritifs nécessaires à une production suffisamment élevée (pas forcément maximale en volume, afin de conserver une bonne qualité technologique du bois). Nous nous sommes donc attachés à définir la composition minérale optimale des différentes essences forestières, à comprendre comment les arbres extrayaient les éléments du sol et à corriger les situations de carence.

Le diagnostic foliaire

De nombreuses études de relations entre la productivité des peuplements ou la croissance des plantations et leur alimentation minérale, ainsi que de nombreux essais de fertilisation, ont permis une approche progressive des teneurs optimales des feuilles en éléments minéraux majeurs. Cette approche descriptive a été sous-tendue par des recherches explicatives sur les voies métaboliques de transport, de mise en réserve et d'incorporation des éléments minéraux dans les tissus de l'arbre.

Beaucoup d'essences et de régions françaises ont bénéficié de tels travaux de recherche (photo 1) : pin maritime (Landes de Gascogne), épicéa (Haute Ardèche, plateaux calcaires du nord-est, Ardennes, Vosges, Massif Central), douglas (Limousin), sapin (Vosges et Jura), peuplier (nord du bassin Parisien), pin laricio (Pays de Loire et Midi Méditerranéen), hêtre (Normandie et Basses Vosges), chêne (Pays de Loire).

Le tableau 1 donne des exemples de normes élaborées de cette façon. À partir de simples analyses foliaires peu

coûteuses, il est ainsi possible de porter un jugement sur l'état nutritionnel d'un peuplement : c'est ce que l'on appelle le diagnostic foliaire.

Acquisition des éléments minéraux du sol par les arbres

Comme presque toutes les plantes, **les arbres forestiers puisent l'eau et les éléments minéraux du sol par l'intermédiaire de champignons associés aux racines fines.** Cette association, obligatoire pour l'arbre comme pour le champignon, est une symbiose ; cela veut dire que les deux partenaires y trouvent un bénéfice : l'arbre nourrit le champignon en sucres et le champignon explore le sol à grande distance de la racine (jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres), extrait l'eau et les éléments nutritifs et les transfère à l'arbre. Outre un plus grand volume de sol exploré, le champignon est capable de solubiliser des formes de phosphore et d'azote autrement inaccessibles aux racines seules ; du fait de la finesse de ses filaments, il peut également pénétrer dans les pores les plus étroits du sol où l'eau persiste plus longtemps en période de sécheresse mais où les racines n'ont pas accès ; enfin, le champignon contribue aussi indirectement à améliorer la nutrition minérale de l'arbre en protégeant les racines contre les maladies dues à d'autres champignons du sol, les pathogènes. L'organe symbiotique mixte racine-champignon est appelé mycorhize (photos 2 et 3).

L'efficacité de ce système absorbant varie selon les espèces de champignons associés (bolets, amanites, russules, lactaires, chanterelles, ...). Par exemple, certains sont particulièrement performants pour l'extraction du phosphore du sol, d'autres pour l'absorption de l'eau en périodes de sécheresse, ou d'autres encore pour la mobilisation de l'azote ou la protection des racines contre les maladies. Sur un sol donné, le statut nutritionel de la forêt dépend donc en grande partie des champignons mycorhiziens présents.

C'est pourquoi l'INRA a déployé beaucoup d'efforts pour mieux comprendre le fonctionnement des symbioses mycorhiziennes. La conséquence pratique de ces connaissances est en effet que deux moyens s'offrent aux forestiers pour améliorer la nutrition minérale des peuplements : l'augmentation de la concentration en éléments nutritifs dans le sol par des apports d'engrais (fertilisation) ou l'amélioration du statut mycorhizien des arbres par inoculation avec des souches sélectionnées de champignon. Différents résultats relevant de ces deux démarches sont présentés ci-dessous.

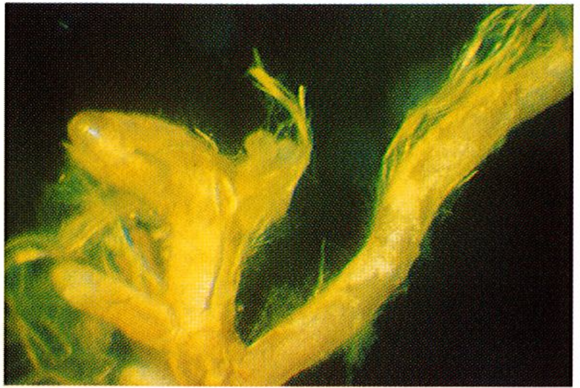
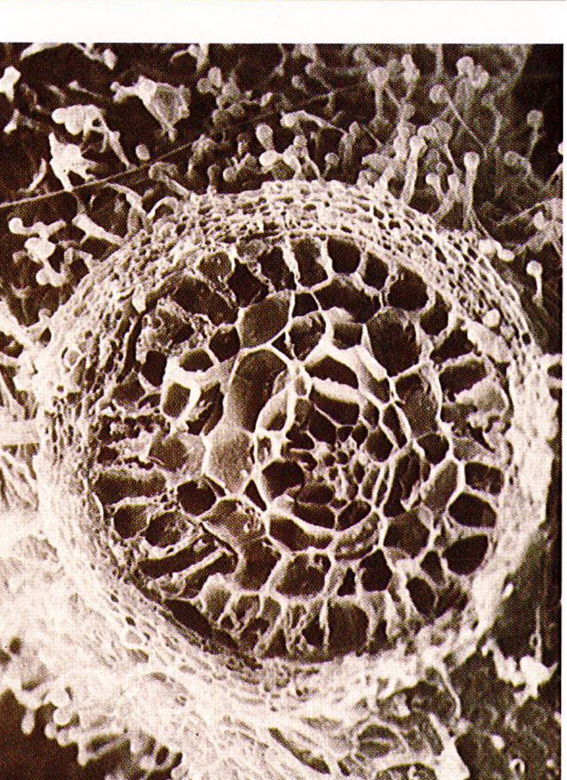


Photo 2• Vue macroscopique d'une mycorhize : on voit les filaments du champignon (ici, de couleur jaune) qui forment un manchon autour de la racine et des mèches qui partent explorer le sol.



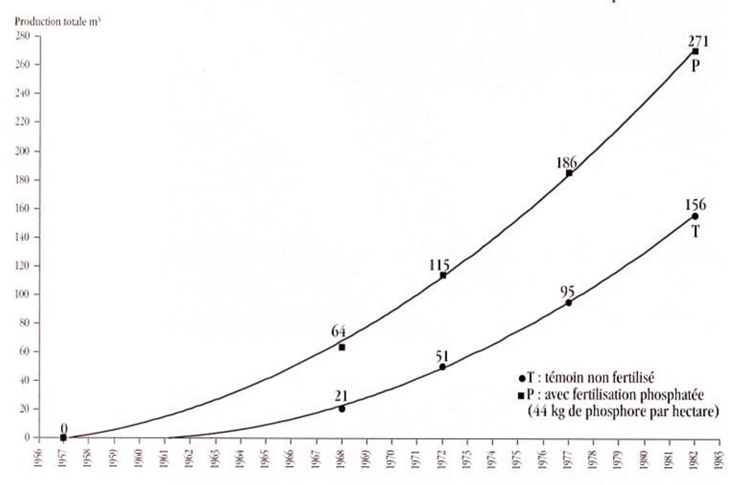
Photos : J. Garbaye

Photo 3• Vue au microscope électronique à balayage de la coupe transversale d'une mycorhize : le manchon fongique (petites cellules) enveloppe la racine (grosses cellules).

Tableau 1• Seuil critique et teneur optimale (entre parenthèses) des éléments majeurs dans les feuilles de quelques espèces forestières cultivées en France (en grammes d'élément par kg de matière sèche)

	Azote	Phosphore	Potassium	Calcium	Magnésium
Epicéa	13 (16)	1,4 (1,7)	4,5 (6)	2 (3)	0,8 (1,2)
Pin maritime	8 (12)	0,9 (1,2)	4 (5)	1,7 (2,5)	— —
Pin laricio	11 (13)	1,2 (1,5)	4 (5)	— —	0,6 (0,7)
Sapin	13 (16)	1,4 (1,8)	5 (6,5)	3 (4)	0,9 (1,5)
Douglas	13 (15)	1,2 (1,5)	6 (8)	2 (3)	— —
Chêne sessile	18 (23)	1,1 (1,5)	(8,5)	(9)	— —
Peuplier	— (28)	— (2,5)	— —	— —	— —

Figure 1 • Réponse du pin maritime à une fertilisation phosphatée appliquée au semis en 1957 à Mimizan (Landes). Production totale en mètres cubes de bois par hectare.



Fertiliser les forêts

La mise en oeuvre du diagnostic foliaire précédemment défini a permis de déceler des insuffisances diverses de l'alimentation minérale de nos forêts, plus ou moins bien expliquées par les conditions de sol. L'INRA a donc déployé dans toute la France un réseau de nombreux essais de fertilisation. Les méthodes de correction ainsi définies ont pu être suivies d'applications régulières par les gestionnaires de forêts. C'est ainsi que la fertilisation phosphatée des semis de pin maritime s'est généralisée dans les Landes et que l'apport de phosphates naturels aux plantations d'épicéa et de douglas est entré en pratique dans le Limousin et en Bretagne. Dans les deux cas, des gains très significatifs de productivité ont été obtenus (photo 4).

Au plan méthodologique, toutes ces recherches sur la fertilisation et le diagnostic foliaire ont permis de développer un savoir-faire qui vaut aux chercheurs français de figurer dans les groupes d'experts internationaux et même de proposer et de faire accepter des procédures de prélèvement et d'analyse unifiées à l'échelle européenne.

Néanmoins, beaucoup de questions restent encore sans réponse satisfaisante et de nombreuses connaissances scientifiques relatives à la nutrition minérale des forêts demeurent insuffisamment exploitées. En particulier, le cas des essences feuillues dites "précieuses" (merisier, érable, noyer, frêne) mériterait d'être plus activement étudié ; ces espèces diffèrent de celles citées jusqu'alors en ceci qu'elles ne forment pas naturellement des peuplements purs et que leurs racines contractent une symbiose mycorhizienne d'un type très différent (le même que les plantes herbacées), ce qui retentit sur leur mode d'acquisition des éléments du sol. Le renouvellement de la fertilisation du pin maritime en cours de rotation devrait également être profitable car l'effet de la première fertilisation apportée au semis cesse après vingt-cinq ans (figure 1).

Il est également des cas où la teneur du sol en éléments nutritifs n'explique pas des états de malnutrition. Dans ces situations ce sont généralement des travaux de plantation mal exécutés ou des propriétés physiques du sol défectueuses qui sont responsables d'un mauvais



Photo : M. Adrian

Photo 4 • Effet d'une fertilisation initiale à base de phosphore, calcium et potassium sur une plantation d'épicéa commun de 20 ans à Razès (près de Limoges) : à gauche, partie non fertilisée ; à droite, partie fertilisée.



Photo : J. Garbaye

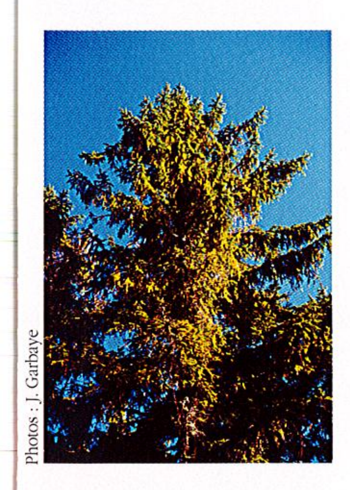
Photo 5 • Épandage d'engrais en forêt par machine soufflante.

développement des racines : les jeunes arbres, notamment pendant les premières années de leur installation, ne peuvent pas profiter convenablement des ressources nutritives du sol. Dans le cas de l'introduction d'une espèce d'arbre étrangère à la région, il peut s'agir également d'un défaut de développement des associations mycorhiziennes dû à l'absence locale de champignons compatibles avec l'essence plantée. Nous verrons dans la dernière partie de ce chapitre comment y remédier.

La correction de l'acidification des sols forestiers

De nombreux peuplements de sapin et d'épicéa des Vosges et des Ardennes souffrent de pertes d'aiguilles ou de jaunissements. Les recherches menées en France à la fin des années quatre-vingts ont montré que ces symptômes étaient associés à des carences en calcium ou en magnésium liées à l'acidification du sol, elle-même causée par des facteurs divers (sylviculture mal adaptée à des sols déjà acides, introduction malencontreuse de certaines essences, pollution atmosphérique, ...).

Des expérimentations dans plusieurs peuplements jaunissants sur sol acide ont démontré l'effet très bénéfique des apports calciques et magnésiens (photos 5, 6a et 6b). Après vérification à une échelle opérationnelle, ce résultat mériterait d'être mis à profit pour restaurer l'état de santé de nombreux peuplements ; ce travail est en cours. La correspondance fréquente qui a pu être établie entre le type de roche-mère et l'apparition des







Photos : J. Garbaye

De gauche à droite
Photos 6a et 6b • Épicéas jaunissants et reverdis par chaulage. À gauche (6a), épicéas jaunissants du fait d'une carence magnésienne et calcique ; à droite (6b), épicéas de couleur normale après fertilisation calcique et magnésienne dans le même essai.
Photo 7 • Inoculation mycorhizienne d'une pépinière forestière.

symptômes de malnutrition, associée à la carte du jaunissement qui a été dressée dans les Vosges, permettrait de déterminer des zones d'intervention prioritaires dans lesquelles une aide financière et technique de l'État inciterait les propriétaires à fertiliser leurs peuplements.

Contrôler la mycorhization

Grâce à un réseau de plantations comparatives dans toutes les grandes régions de reboisement françaises, les chercheurs de l'INRA sélectionnent des souches de champignons mycorhiziens particulièrement performantes pour stimuler la croissance des jeunes arbres. Pour ce faire, ils produisent en pépinière des plants qu'ils inoculent avec des cultures pures de champignons effectuées au laboratoire.

Cette approche n'est qu'une alternative à la fertilisation pour améliorer la nutrition minérale, mais elle présente un certain nombre d'avantages spécifiques : aucune intervention particulière en forêt (les plants sortent de la pépinière et sont livrés déjà équipés du champignon choisi), pas de dépense d'énergie ou de matières premières, aucun risque de pollution du sol ou des eaux, effet bénéfique sélectif sur l'essence plantée entraînant des économies de dégagement (les plantes concurrentes ne s'associent pas au champignon introduit), et effets non directement nutritionnels renforçant l'amélioration de la survie initiale des plants (ce qui économise les regarnis) et de la croissance initiale du peuplement.

C'est ainsi qu'un procédé mettant en oeuvre une souche particulièrement performante de *Laccaria laccata* (le laccaire laqué, champignon mycorhizien très fréquent en France) a fait l'objet d'une licence d'exploitation entre l'INRA et un groupement de pépinières forestières pour la production à grande échelle de plants de douglas mycorhizés artificiellement : le champignon cultivé au laboratoire est incorporé au sol de la pépinière avant le semis des graines (photo 7) et les plants obtenus, massivement mycorhizés par la souche sélectionnée, sont contrôlés et commercialisés sous label INRA. Ils permettent de réaliser directement des plantations tirant mieux parti de la fertilité naturelle du sol et plus vigoureuses pour un surcoût d'environ 1 000 F seulement par hectare (photos 8a et 8b). Le douglas étant la principale essence plantée en France, cette technique biologique respectueuse de l'environnement est certainement appelée à se développer. Elle est applicable sur tous les sols acides où l'on plante le douglas à grande échelle, comme dans le Limousin, les Vosges, les Ardennes et en Bretagne.

Conclusion et perspectives

Avec l'économie de l'eau, les ressources minérales du sol assimilables par les arbres sont donc le principal facteur à prendre en compte pour assurer une gestion durable de nos ressources forestières. Mais, contrairement à l'eau, le "capital sol" n'est pas renouvelable et un soin particulier doit être apporté au maintien de sa fertilité naturelle, à la correction de ses défauts éventuels, au suivi de son évolution et au choix des essences cultivées.

C'est pourquoi les chercheurs forestiers de l'INRA ont beaucoup investi dans la mise au point d'outils de diagnostic (bilan des éléments dans un peuplement, diagnostic de l'état de nutrition par analyses foliaires) et de techniques d'intervention respectueuses des grands équilibres écologiques (fertilisation, chaulage, mycorhization contrôlée). Cette activité est maintenant concrétisée par la mise en oeuvre effective par les professions forestières de mesures contribuant à la gestion durable des forêts françaises.

Cependant, face à l'extrême complexité des interactions au sein des écosystèmes forestiers, beaucoup reste à faire avant de comprendre les mécanismes essentiels et de prétendre intervenir de façon optimale. Les principaux domaines d'étude brièvement évoqués ci-dessus doivent donc encore faire l'objet de recherches fondamentales mobilisant un grand nombre de disciplines scientifiques.

Maurice Bonneau,
INRA, Cycles biogéochimiques,
Jean Garbaye,
INRA, Microbiologie forestière,
Centre de Recherches de Nancy,
54280 Champenoux ■





Photos 8a et 8b •
Effet de la mycorhization contrôlée sur la croissance d'une jeune plantation de douglas. En haut (8a), plants témoins non inoculés. En bas (8b), plants inoculés par le champignon *Laccaria laccata*. Le piquet portant la pancarte a la même hauteur dans les deux cas.
Photos : J. Garbaye.

Pour en savoir plus

• M. Bonneau 1988.
Le diagnostic foliaire. Revue forestière française, volume 40, numéro spécial Diagnostic en forêt, 19-23.
• M. Bonneau 1995.
Fertilisation des forêts dans les pays tempérés : théorie, bases du diagnostic, conseils pratiques, réalisations expérimentales. ENGREF, Nancy, 376 p.
• F. Le Tacon et D. Bouchard 1991.
Les possibilités de mycorhization contrôlée en sylviculture tempérée. Forêt Entreprise 74, 24-41.





L'été indien dans les Laurentides - Canada. Photo : © R. Rozencwajg

La biodiversité

Terme galvaudé, au contour plus ou moins précis, la diversité biologique, sa promotion et sa protection sont devenues des sujets d'intérêt majeur pour les forestiers. Globalement la diversité biologique est plus importante et plus complexe aux plans structures et fonctions, en forêt (même dans des écosystèmes forestiers artificialisés tels que la pinède landaise) que dans d'autres écosystèmes continentaux.

Les recherches forestières à l'INRA ont abordé le problème de la description structurelle et fonctionnelle de la biodiversité par plusieurs voies :

- études de caractérisation (typologie) des écosystèmes forestiers et évolution temporelle ;
- études de la diversité génétique inter et intra-spécifique des espèces forestières, de son organisation spatiale et de son évolution ;
- interactions entre arbres, insectes et micro-organismes : ravageurs, pathogènes ou auxiliaires ;
- dynamique des peuplements hétérogènes : arbres de plusieurs espèces et d'âges variés.

1 Comment caractériser les écosystèmes dans leur diversité ?

Traditionnellement, les forestiers français ont une longue habitude de la gestion écologique des ressources forestières. Le principe, basé sur le respect des équilibres naturels, est de prélever sur la forêt des produits utiles à la société, tout en assurant le maintien, voire l'amélioration des capacités de production du milieu à long terme.



Hepatica nobilis.

Photo : M. Becker

"Imiter la nature, aider son oeuvre, telle est la maxime fondamentale de la sylviculture" enseignait-on déjà à l'École forestière de Nancy au siècle dernier.

Bien connaître pour mieux gérer

La mise en oeuvre d'une telle sylviculture performante nécessite d'abord une bonne connaissance des caractéristiques écophysiologiques des espèces "cultivées", à savoir leur réponse aux facteurs fondamentaux relatifs au sol et au climat ; ce que les anciens forestiers appelaient le "tempérament" des essences forestières. Mais cette connaissance et son affinement incessant seraient parfaitement insuffisants si l'on ne savait identifier avec sûreté sur le terrain la variabilité des conditions de milieu, afin de raisonner au mieux le choix des espèces à installer ou à promouvoir et le détail des opérations sylvicoles à leur appliquer. Or, pendant bien longtemps, dans ce domaine comme dans d'autres, il y a eu loin des idées aux réalisations concrètes, et plus encore à leur généralisation. Depuis 1965, et surtout dans les années 1970, l'INRA, d'abord seul puis, peu à peu, avec d'autres partenaires des secteurs public et privé, a œuvré pour imaginer, mettre au point et éprouver une démarche méthodologique apte à combler aussi rapidement que possible le déficit de connaissance des écosystèmes forestiers français. Ceci est d'autant plus important que ces derniers sont certainement les plus riches et les plus diversifiés d'Europe, du fait de la grande variété climatique, géologique et orographique [1] de notre pays.

[1] Relief de montagnes.

Par ailleurs, cette diversité des écosystèmes fait partie intégrante de la *biodiversité* au sens large des forêts, perçue dans ce cas non à l'échelle des espèces prises individuellement mais à celle des biotopes et de l'ensemble des êtres vivants qu'ils abritent. Les études décrites ici constituent donc également un moyen privilégié pour appréhender la biodiversité de notre territoire forestier.

La notion de station forestière

Le principe général de cette démarche est de structurer l'espace, boisé ou susceptible de l'être, en unités homogènes appelées "stations".

Selon la définition unanimement admise aujourd'hui, *"une station est une étendue de terrain, de superficie variable, homogène dans ses conditions physiques et biologiques (mésoclimat, topographie, sol, composition floristique et structure de la végétation). Une station forestière justifie, pour une essence donnée, une même sylviculture, avec laquelle on peut espérer une productivité comprise entre des limites connues."*

Échelle de travail

Outre la grande variabilité climatique et géologique de la France, diverses raisons scientifiques obligent à un découpage géographique préalable du territoire en unités susceptibles de faire l'objet d'une typologie spécifique. Ces raisons concernent essentiellement le volet "végétation" de l'étude. Il faut en effet prendre en compte l'aire naturelle de répartition actuelle des espèces (*chorologie*), sorte de cliché instantané des migrations des espèces à l'échelle des temps géologiques. Il faut aussi être attentif aux *compensations de facteurs* (entre facteurs édaphiques et climatiques en particulier), qui font, par exemple, que le chêne pubescent se comporte comme une espèce végétale adaptée au sol calcaire dans la moitié nord de la France, alors qu'elle est indifférente à ce facteur dans le Midi. Il faut enfin savoir que la variabilité génétique de certaines espèces est telle qu'il existe des races géographiques aux caractéristiques écophysiologiques contrastées (*écotypes*).

C'est pourquoi il est recommandé de travailler à l'échelle de la *petite région naturelle*, entité géographique caractérisée par un certain degré d'homogénéité vis-à-vis du macroclimat (climat régional lié à la latitude et aux mouvements habituels des grandes masses d'air). Secondairement, à condition que l'unité ainsi définie ait une superficie suffisante (quelques dizaines de milliers d'hectares au minimum), le critère d'homogénéité peut également être appliqué avec profit aux grandes catégories de matériaux sur lesquels les sols se sont formés (calcaires, sables et grès, marnes et argiles, ...).

Place du sol et de la végétation dans l'élaboration d'une typologie

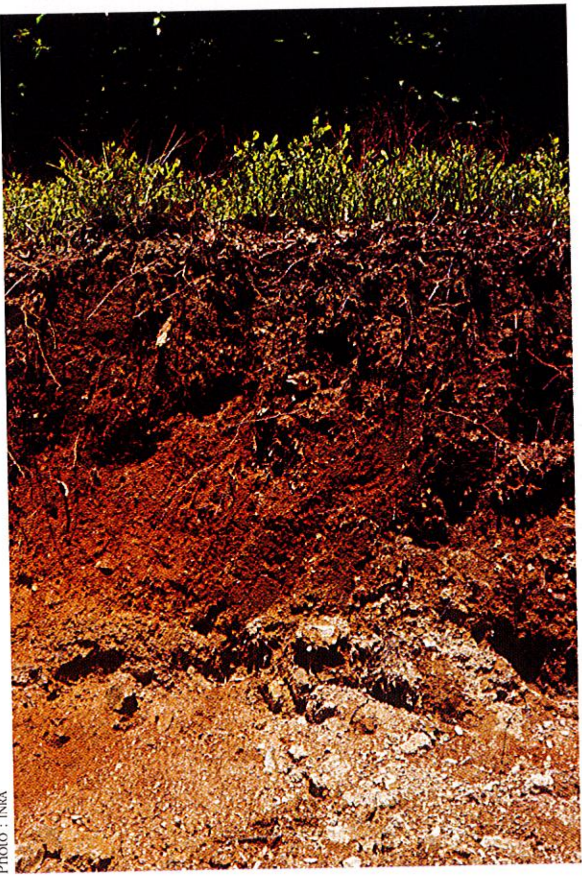
Il est indispensable d'associer étroitement étude du sol et étude de la végétation au cours de la phase de typologie, et de se garder de toute exclusive *a priori*.

Outre le faible coût de leur prise en compte, les critères floristiques présentent l'intérêt de pouvoir renseigner à la fois sur les facteurs édaphiques et sur les facteurs climatiques; ils s'avèrent aussi souvent plus fins qu'une description morphologique du sol dans l'appréciation du niveau de fertilité minérale. Ils ne sont pourtant pas la panacée de la typologie des stations: ils peuvent parfois mal refléter les réserves hydriques profondes auxquelles les arbres ont accès. Mais surtout, leur utilisation dans les milieux artificialisés ou dégradés peut s'avérer difficile et nécessiter la mise en évidence au préalable des séries dynamiques correspondantes de la végétation, ce qui n'est pas toujours possible. Une attention plus particulière doit alors être portée aux autres descripteurs du milieu.

La démarche méthodologique généralement utilisée

Seules sont rapportées ici les grandes lignes des diverses étapes menant à la caractérisation exhaustive des types de stations d'une région donnée.

Il est vivement conseillé de faire précéder l'étude proprement dite d'une "pré-étude" de quelques mois. Cette pré-étude est avant tout consacrée à la collecte d'un maximum d'informations bibliographiques concernant la région, dans les domaines les plus divers (climat, géolo-


Photo : INRA

Sol ocre podzolique, caractérisé par une pauvreté parfois critique en éléments minéraux.





À gauche : *Lonicera xylosteum*
À droite : *Aquilegia vulgaris*

Photos : M. Becker

gie, géomorphologie, pédologie, phytosociologie, histoire forestière...). La pré-étude peut déboucher sur la rédaction d'une monographie. Elle permet de valider et de préciser les contours de la région à étudier, en fonction des critères exposés précédemment, et de fournir les éléments indispensables à la bonne préparation de l'étape suivante, la conception de l'échantillonnage.

L'échantillonnage des points de collecte de données phytoécologiques, appelés "relevés" est une phase capitale. La pratique a montré que la méthode des transects, le long desquels les relevés sont régulièrement répartis, est en général la plus performante. Par le choix du tracé des transects, établi sur carte géographique à grande échelle, elle constitue en particulier un moyen commode de stratification des efforts, qui permet de valoriser au mieux les connaissances préalables acquises lors de la pré-étude. D'un autre côté, la répartition systématique des points d'échantillonage le long des transects permet d'assurer la solidité statistique des résultats. Le nombre total de relevés nécessaires varie beaucoup selon la complexité de la région étudiée, mais l'ordre de grandeur est de quelques centaines.

Une première phase de terrain permet de recueillir sur chaque relevé l'essentiel des données phytoécologiques : végétation, sol, situation topographique et géomorphologique. La surface sur laquelle sont faites ces observations est de quelques ares, et son implantation précise doit répondre à des critères d'homogénéité locale très contraignants. Cette phase peut s'étaler sur une ou deux saisons de végétation selon la taille de l'échantillon total.

L'interprétation efficace des très nombreuses informations ainsi recueillies sur le terrain passe par la mise en oeuvre informatisée d'analyses multivariables complexes mais désormais bien rodées (par exemple : analyse factorielle des correspondances, classification ascendante hiérarchique). Ces traitements informatisés aident à l'élaboration d'un tableau général provisoire. Ce tableau a pour objectif de structurer d'une part les relevés et d'autre part les variables qui y ont été recueillies en unités stationnelles (groupes de relevés) et caractéristiques phytoécologiques similaires associées à ces unités.

Une deuxième phase de terrain, en général beaucoup plus courte que la précédente, est alors nécessaire. Elle a pour but :

- de compléter certains relevés floristiques (certaines espèces, par exemple, ne sont visibles qu'au printemps),
- mais aussi de parfaire un échantillonnage qui se serait révélé déficient en nombre de relevés pour certaines unités stationnelles,
- enfin et surtout de choisir avec objectivité un nombre limité de relevés représentatifs de chaque unité pour une caractérisation fine (et coûteuse, donc à réaliser avec parcimonie...) du sol, avec analyse physico-chimique de laboratoire d'échantillons collectés sur le terrain après creusement de fosses pédologiques.

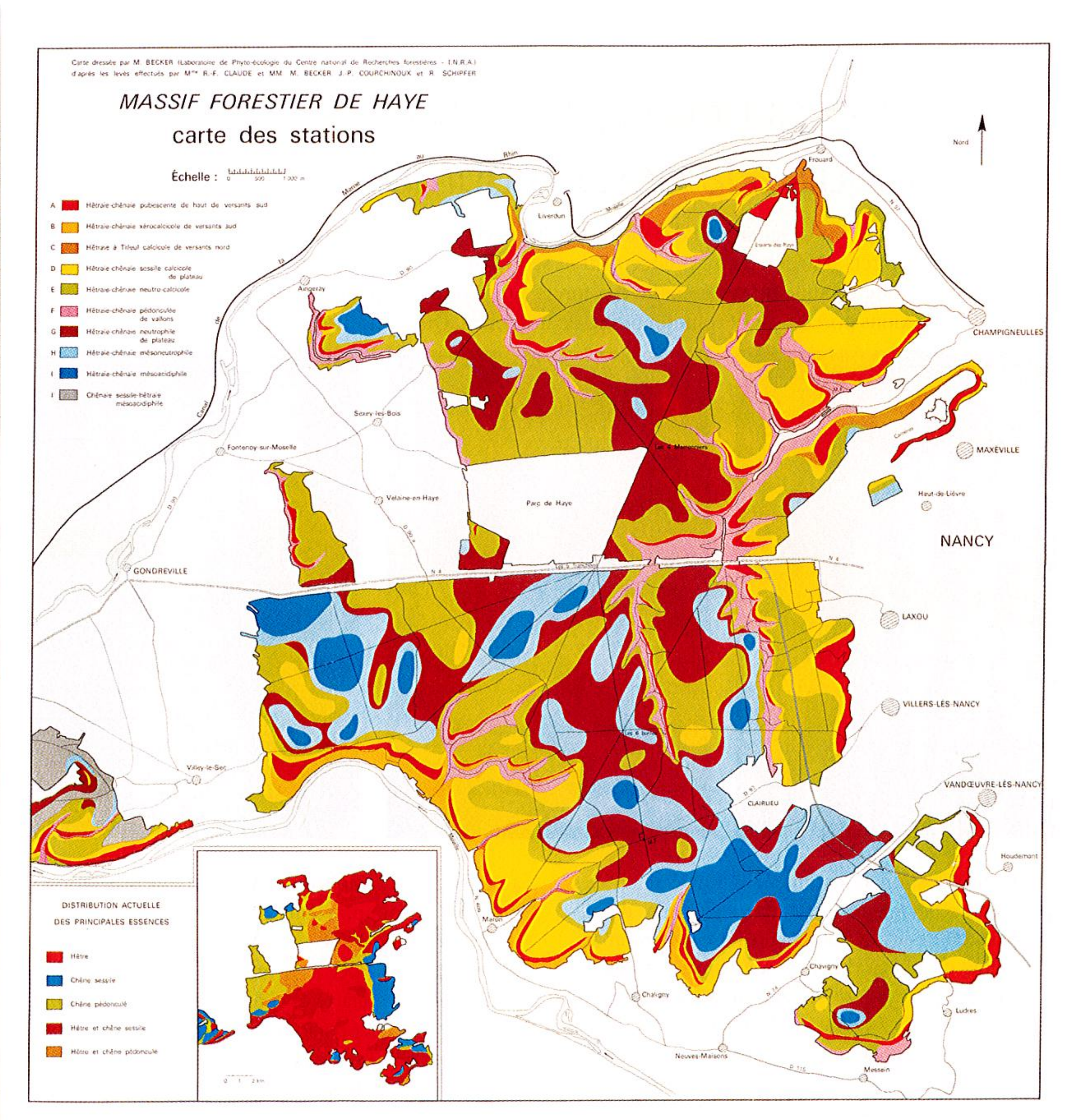
Après un éventuel et ultime traitement informatisé des données, vient enfin la synthèse des résultats et la rédaction d'un catalogue des stations forestières.

Le catalogue des stations forestières

Les résultats d'une étude de typologie sont rapportés dans un document communément appelé "catalogue des stations forestières". Ce document est mis à la disposition, principalement, des gestionnaires forestiers de la région considérée. Mais toutes les personnes ayant affaire avec la forêt (chercheurs, enseignants, public "éclairé"...) peuvent aussi trouver d'utiles renseignements dans cette synthèse. Il présente de manière détaillée toutes les stations identifiées : caractères physiques, végétation caractéristique, répartition spatiale, aptitudes forestières, sensibilité à diverses agressions...

Typologie et cartographie des stations

Il convient de se garder de l'amalgame que l'on peut être tenté de faire entre typologie et cartographie des stations. Si la carte des stations est bien l'un des produits finis souhaités par le forestier pour l'aider à définir la gestion d'une forêt, il demeure qu'il s'agit là de deux étapes à séparer nettement dans le temps. Étant donné que l'on ne peut cartographier que des entités préalablement définies, la typologie doit naturellement précé-



Cette carte de Michel Becker est reprise de la Revue forestière française, vol. XXX, 1978 et des Annales des Sciences forestières, vol. 36, 1979.

der la cartographie, qui n'en est d'ailleurs pas la seule utilisation possible. La typologie des stations forestières consiste, pour un domaine forestier déterminé, à établir et à caractériser tous les "types de stations" que l'on est susceptible d'y rencontrer.

La situation actuelle

À la fin des années 1970, la France comptait encore un retard considérable par rapport à nombre de ses voisins européens dans la caractérisation phytoécologique de son territoire forestier. Un travail considérable a depuis été accompli, sur la base essentiellement des concepts et de la démarche exposés ci-dessus. Aujourd'hui, grâce aux efforts financiers consentis par le ministère de l'Agriculture et l'Office National des Forêts, et à l'implication humaine et matérielle de divers partenaires d'horizons très variés (CEMAGREF, IDF, ENGREF, ONF, INRA, Université, CNRS, CRPF, IFN, ...), on estime que près des deux-tiers du territoire forestier français sont couverts par un catalogue de stations. Les travaux se poursuivent.

Les études de stations fournissent au forestier des informations irremplaçables pour élaborer la gestion dans l'espace et dans le temps du domaine dont il a la responsabilité. Elles lui permettent d'inclure aussi dans sa réflexion les préoccupations relatives à la biodiversité de son territoire, tant à l'échelle des communautés végétales et des biotopes qui les abritent, qu'à celle des espèces prises isolément. Le catalogue des stations et les cartes qu'il permet d'établir deviennent alors des outils de dialogue objectifs et constructifs entre le forestier gestionnaire, d'abord soucieux de répondre aux besoins de la filière bois, et le naturaliste, préoccupé avant tout par les espèces et les biotopes menacés, et, plus généralement, par le maintien de la biodiversité naturelle du territoire.

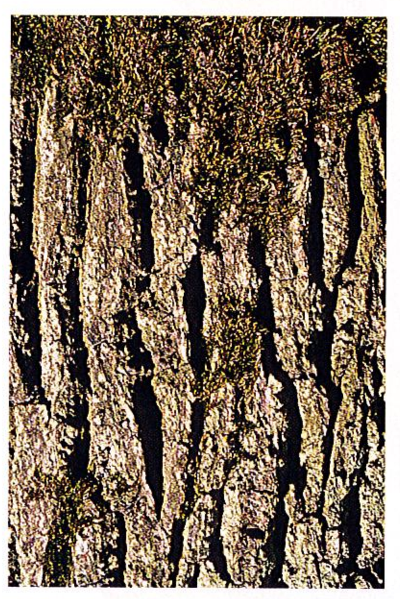
Michel Becker,
INRA, Écophysiologie forestière,
Équipe phytoécologie forestière,
Centre de Recherches de Nancy, 54280 Champenoux ■

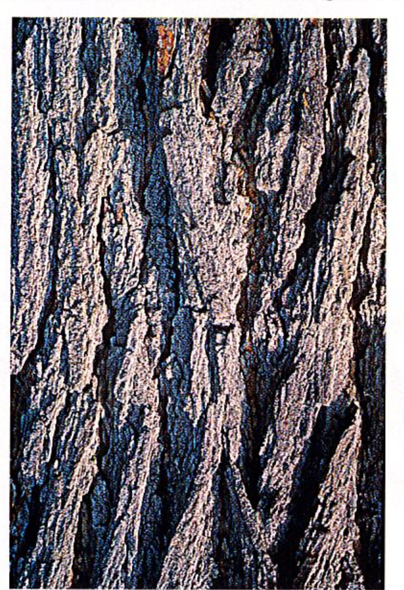
Pour en savoir plus

• M. Becker, 1978. Définition des stations en forêt de Haye (54). Potentialités du hêtre et du chêne. Revue forestière française, 30, 4, 251-268.
• M. Becker, F. Le Tacon, J. Timbal, 1980. Les plateaux calcaires de Lorraine. Types de stations et potentialités forestières. Éditions de l'ENGREF, Nancy, 268 p. + 1 tableau.
• M. Becker, F. Le Tacon, 1985. Santé de la forêt : importance d'une sylviculture adaptée aux conditions de milieu. Revue forestière française, n° spécial, 7-28.
• M. Becker, N. Le Goff, 1988. Diagnostic stationnel et potentiel de production. Revue forestière française, 40, n° sp., 29-43.

2 La diversité génétique des arbres forestiers : un prérequis à la gestion durable des forêts

La diversité génétique est devenue l'un des mots clés des scientifiques et des sylviculteurs soucieux de la gestion durable des forêts. Derrière cette préoccupation se profile l'hypothèse qu'à une diversité génétique élevée est associée une garantie de la pérennité des forêts. Souvent tenue pour acquise, cette hypothèse est au centre des réflexions portant sur l'évolution future de nos forêts. Qu'en est-il vraiment ?







Photos : C. Maczak

Cette question nous amène à un examen des recherches menées par les généticiens, depuis l'introduction de cette discipline chez les arbres. Elle mérite qu'un état des lieux soit dressé sur l'importance et la distribution de la diversité au sein des écosystèmes forestiers. Cet état des lieux doit bien évidemment s'adresser à la diversité dans son acception la plus globale, englobant tous les caractères étudiés (adaptation, vigueur, marqueurs 'anonymes'). Le développement récent des outils moléculaires permettant d'élucider les mécanismes, historiques et contemporains, responsables du maintien et de l'évolution de la diversité nous autorise aujourd'hui à anticiper sur l'évolution future. Enfin, bien avant d'en comprendre la dynamique, les généticiens de l'INRA ont tiré bénéfice de cette diversité en développant des programmes d'amélioration des espèces utilisées en reboisement et ont mis en place des protocoles expérimentaux visant à la maintenir. C'est dans ce triple examen (état des lieux, valorisation et évolution) qu'il faut analyser la relation diversité=pérennité.

Cinquante ans de recherches à l'INRA sur la diversité des arbres

Que sait-on aujourd'hui de la diversité génétique chez les arbres forestiers ?

Le résultat le plus frappant et le plus général - au sens où il concerne la grande majorité des espèces étudiées à ce jour - est l'ampleur de la diversité génétique que recèlent les peuplements forestiers, par rapport à d'autres organismes. La comparaison des niveaux de diversité d'une espèce avec une autre est généralement faite à partir de caractères communs. À titre d'exemple on peut dénombrer pour une même protéine le nombre de gènes (allèles) contrôlant la synthèse de cette protéine dans une population. Les synthèses bibliographiques faites sur ce sujet montrent de manière manifeste que les arbres forestiers sont parmi les espèces les plus polymorphes du règne végétal et même du règne animal (à l'exception des invertébrés). Au plan quantitatif, ce résultat peut s'énoncer de la manière suivante : "deux gènes, contrôlant la synthèse d'une même protéine, tirés au hasard dans un peuplement forestier ont quatre fois plus de chances d'être différents que s'ils étaient tirés dans une population humaine". Ces observations faites sur des caractères comparables entre espèces sont confortées par les très nombreuses données accumulées par les sélectionneurs d'arbres forestiers sur les caractères d'intérêt économique (croissance, forme, adaptation) : l'écart type de la variation génétique de ces caractères représente souvent plus de 10 % de la moyenne du caractère en question.

Où réside la diversité : entre peuplements ou entre arbres d'un même peuplement ?

Il n'y a pas de réponse unique à cette question. Schématiquement, deux grands types d'organisation

géographique de la diversité sont discernables dans l'ensemble des résultats publiés à ce jour.

• Il y a d'une part les caractères qui manifestent une très grande variabilité entre populations : il s'agit surtout des caractères phénologiques et adaptatifs. Dans certains cas des "patterns" de variabilité communs à de très nombreuses espèces ont été mis en évidence. Les plus connus suivent des clines (gradients) latitudinaux, altitudinaux ou longitudinaux. Par exemple, les populations issues des latitudes les plus nordiques (ou altitudes les plus élevées) manifestent un arrêt de croissance plus précoce que les populations de latitudes plus méridionales (altitudes plus basses), quelle que soit l'espèce étudiée. Les tests de provenances (populations) consistant à comparer en un même milieu des populations d'origines différentes ont été mis en place pour la majorité des espèces jouissant d'un intérêt économique et permettent de cerner cette variabilité géographique. Alors que des clines ont été mis en évidence pour les caractères phénologiques, l'organisation est souvent beaucoup plus désordonnée pour d'autres caractères ; elle peut également varier d'une espèce à une autre pour un même caractère.

• Il y a d'autre part les caractères pour lesquels la diversité entre arbres au sein d'un même peuplement est nettement plus élevée que la diversité entre populations. En règle générale, les caractères moléculaires (marqueurs de l'ADN), ou biochimiques (protéines, terpènes) suivent ce type de variabilité. Les résultats sont remarquablement concordants entre espèces et tendent à montrer une très forte homogénéité entre populations quelle que soit leur proximité géographique. À titre d'exemple, si des populations de chêne sessile roumain sont comparées à leurs homologues françaises, les différences de fréquences alléliques sont souvent inférieures à 10% !

Cet apparent contraste traduit en fait l'effet de forces évolutives différentes agissant sur les niveaux moléculaires et phénotypiques. Alors que les caractères phénotypiques analysés à ce jour sont souvent liés à l'adaptation au milieu, les marqueurs moléculaires restent neutres dans leur grande majorité. La diversité des premiers est plutôt le reflet des pressions de sélection naturelle, alors que celle des seconds reflète l'effet de l'histoire des populations (migration, dérive génétique). C'est cette dichotomie qui est d'ailleurs mise à profit par les généticiens des populations pour séparer les effets de l'histoire et de la sélection sur la structure actuelle de la diversité génétique dans les populations naturelles.

La diversité génétique élevée chez les arbres : luxe ou nécessité ?

L'état des lieux brossé précédemment suscite de nombreuses interrogations sur les mécanismes qui l'ont façonné. On est tout d'abord frappé par le caractère général des résultats évoqués : peu d'espèces (dans la zone tempérée) en effet échappent au tableau rapidement résumé dans les paragraphes précédents. Seules quelques exceptions ont été mentionnées dans la littérature telles que *Pinus resinosa*, *Pinus torreyana*, espèces nord-américaines qui ont pour particularité de manifester une absence totale de diversité, que ce soit pour des caractères moléculaires ou phénotypiques, et quel que soit le niveau de diversité considéré. Pour la majorité des espèces présentant des niveaux de diversité élevée, il faut donc imaginer des mécanismes systématiques contribuant à maintenir de tels niveaux.

Les études de régime de reproduction faites chez les arbres forestiers dans les peuplements naturels ont révélé un niveau très élevé d'allogamie. Les taux d'allofécondation sont en règle générale supérieurs à 90% ; ces chiffres sont confirmés par les expériences d'autofécondation contrôlée. Pour certaines espèces (Fagacées) on peut même évoquer l'existence de mécanismes d'auto-incompatibilité. Le maintien d'une diversité élevée grâce à l'allogamie est renforcé par la prolificité des espèces (fructifications importantes se cumulant sur plusieurs années) freinant de la sorte les pertes dues à la dérive génétique. Enfin la majorité d'entre elles observent une pollinisation anémophile [1] permettant des flux de gènes importants entre populations voisines. Toutes ces particularités biologiques, souvent assez homogènes entre les diverses espèces, contribuent au maintien d'une diversité très élevée, qui pourrait apparaître ainsi comme une conséquence heureuse de la biologie de ces espèces. En effet, les essais d'autofécondation contrôlée faits chez les arbres révèlent souvent de nombreux gènes léthaux, témoins d'un "fardeau" génétique accumulé au cours de l'évolution et responsable en partie des niveaux élevés de diversité. Mise en évidence par les nombreuses études faites en génétique des populations et en génétique quantitative, et maintenue grâce surtout à des flux de gènes très importants, la diversité génétique est-elle pour autant un "luxe" ? C'est oublier que les mécanismes responsables du maintien de la diversité peuvent eux-mêmes être soumis à un déterminisme génétique, dont pour l'instant nous n'avons nulle preuve expérimentale faute de l'avoir étudié. C'est aussi occulter les pressions de sélection auxquelles sont soumis des organismes pérennes (variabilité des conditions climatiques et écologiques). Il faut

[1] Pollinisation par le vent

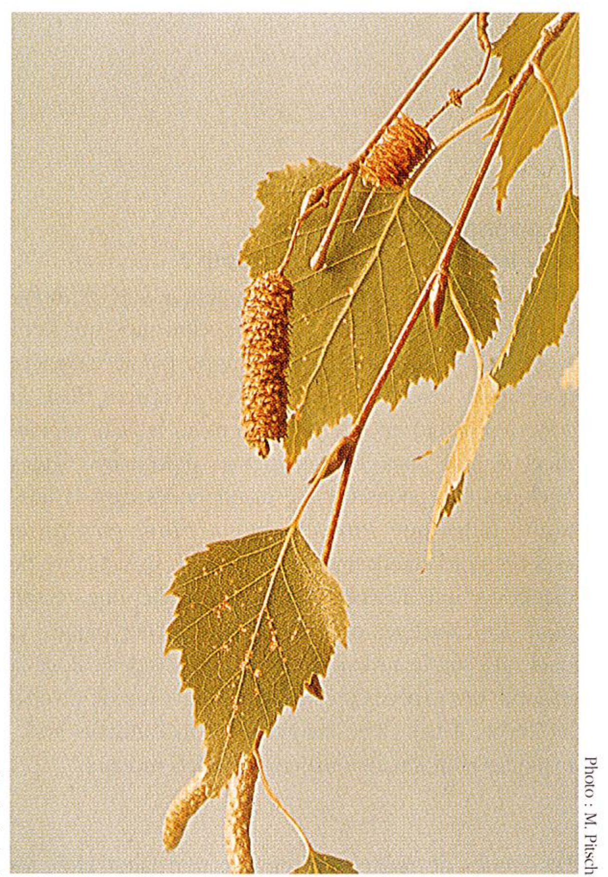


Photo : M. Pitsch

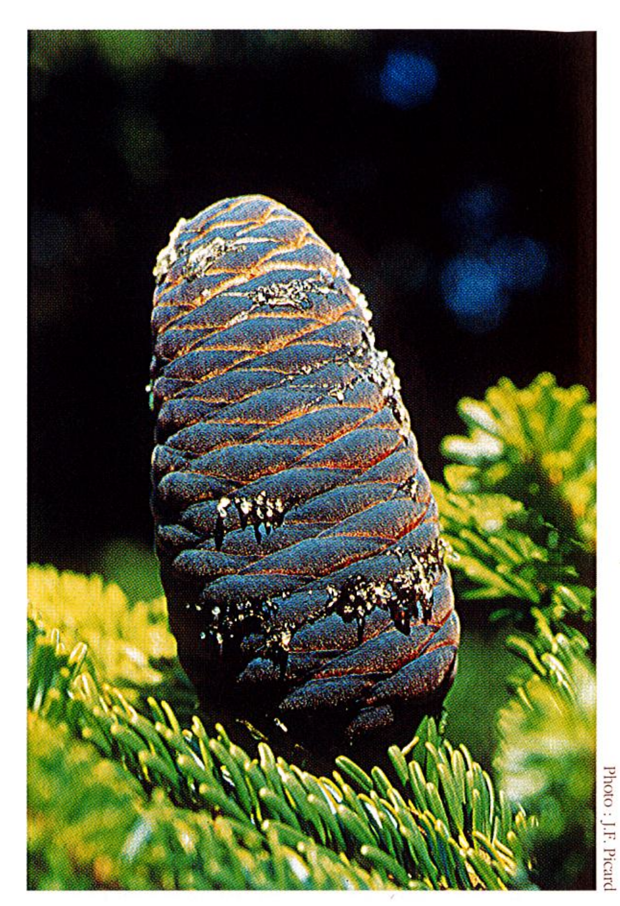


Photo : J.F. Picard

De gauche à droite
Cône de sapin de Corée.
Fruit et feuilles de bouleau.
Fruit d'érable.
Fruit et feuilles de charme.

donc également considérer la diversité génétique comme une nécessité au maintien des espèces.

La diversité génétique : un facteur de l'adaptation rapide des populations

À quelle vitesse se modifient les arbres forestiers ? Cette question, lieu commun des généticiens des populations, reste au centre de l'actualité dans le contexte de l'évolution climatique. Des résultats, très disparates certes et issus des dispositifs de comparaison de populations, sont concordants et nous apprennent que cette évolution peut être extrêmement rapide. L'exemple des espèces exotiques, dont l'introduction en France est connue, est particulièrement pertinent à cet égard. Le chêne rouge d'Amérique est présent sur notre territoire depuis cinq à dix générations au maximum. Or les comparaisons des populations introduites en France avec celles de l'aire naturelle, nous montrent que les premières se sont déjà nettement différenciées par rapport aux secondes. Le pin maritime, constitue un autre exemple particulièrement démonstratif. Des peuplements épars ont été plantés, depuis le siècle dernier le long d'un axe Bordeaux-Clermont-Ferrand à partir d'origines landaises. L'évaluation de nos jours des descendants de ces populations pour la résistance au froid met en évidence un gradient de variabilité suivant le même axe. Force est de reconnaître que les espèces forestières peuvent réagir très rapidement aux contraintes du milieu, en partie grâce à leur niveau élevé de diversité génétique.

Les actions concrètes engagées par l'INRA pour le présent et le futur

La diversité génétique : une richesse biologique déjà valorisée dans la sylviculture

Depuis les premiers essais de Vilmorin au siècle dernier à l'Arboretum des Barres, où les comparaisons entre populations de pin sylvestre avaient été faites, et surtout depuis 1960, les généticiens de l'INRA ont mis en place des dispositifs de comparaison de provenances destinés à estimer la variabilité entre populations d'une même espèce originaires de régions géographiques différentes de l'aire de distribution. Ces essais, qui portent souvent sur plusieurs décennies, permettent d'identifier les populations jouissant de propriétés particulières directement valorisables au niveau de la filière bois. On peut considérer aujourd'hui que, pour toutes les espèces allochtones ou autochtones faisant l'objet de plantations artificielles, de telles expérimentations ont été mises en place. Parmi les résultats les plus significatifs, on peut rappeler l'intérêt des populations de pin sylvestre du Nord-Est de la France (Bitche-Haguenau) et de Mazurie (Pologne) pour leur rectitude, celui des populations d'épicéa commun d'Europe Centrale (Sud de la Pologne, République Tchèque et Slovaque, Roumanie) pour leur débourrement tardif, celui des populations de sapin pectiné d'Europe méridionale (Roumanie, Bulgarie) pour la croissance en hauteur.

Enfin la diversité génétique au sein d'une population est valorisée dans les schémas de sélection artificielle mis en place depuis 1960 pour les espèces ayant de courtes rotations et un intérêt économique prépondé-





rant (peuplier, pin maritime, douglas...). Les programmes d'amélioration conduits par l'INRA tendent à concilier un gain génétique soutenu et une diversité génétique élevée en s'attachant à maintenir des tailles élevées pour les populations soumises à sélection. Des variétés améliorées sont d'ores et déjà utilisées dans le reboisement.

La diversité génétique : une richesse à conserver

Même si la surface forestière française augmente de manière continue, les pratiques sylvicoles actuelles et d'aménagement du territoire risquent d'éroder la diversité génétique présente dans les peuplements. D'une part, les plantations à partir d'un nombre limité de sources de graines tendent à se substituer progressivement à la régénération naturelle. D'autre part, la fragmentation des forêts due à des opérations d'aménagement du territoire diverses peut conduire à limiter les flux de gènes, mécanisme essentiel au maintien de la diversité. Enfin, certaines espèces sont menacées de disparition (orme). À un degré moindre les populations de peupliers noirs s'amoindrissent à la suite de plantations faites à partir d'un nombre limité de clones hybrides. Pour toutes ces raisons, des mesures de conservation ont été prises auxquelles participent activement l'INRA, en coopération avec d'autres organismes (CEMAGREF). L'INRA a mis en place des plantations de comparaison (espèces, provenances, familles, clones) pour plus de 60 espèces d'arbres forestiers (soit 32 000 entités) qui peuvent jouer, en partie, le rôle de parcelles conservatoires. À ces dispositifs de conservation *ex situ*, il faut ajouter le repérage et la conservation de parcelles *in situ*, pour lesquelles des mesures concrètes de régénération sont prises en vue de maintenir la diversité. Ces mesures concernent le hêtre, le peuplier noir, le sapin pectiné, l'orme, le merisier et seront étendues à d'autres espèces.

Les recherches sur la diversité génétique des arbres : un apport original aux sciences de l'évolution et à la gestion des populations naturelles

La diversité génétique : le témoignage de l'histoire des populations

L'évolution historique des populations n'était jusqu'à présent accessible qu'au travers des restes fossiles (pollen ou bois), qui nous permettaient de retracer la présence des différentes espèces au cours du quaternaire et notamment d'identifier les zones refuges au cours de la dernière période glaciaire. Les cartes d'iso-pollen dans les sédiments renseignent par ailleurs sur la vitesse de recolonisation des espèces. L'analyse du polymorphisme dans des génomes transmis uniquement par les graines nous autorise aujourd'hui à retracer les voies de recolonisation suivies par les "lignées" issues des différentes zones refuges. Chez les angiospermes, les mitochondries et les chloroplastes sont des organites cellulaires à hérédité maternelle et contiennent tous deux des molécules d'ADN. L'absence de recombinaison dans l'ADN chloroplastique permet ainsi de reconstruire la généalogie des différents variants génétiques. La répartition géographique de ces variants et de leurs plus proches apparentés est le reflet des voies de migration

De gauche à droite
Cône de mélèze d'Europe.
Cône de douglas.

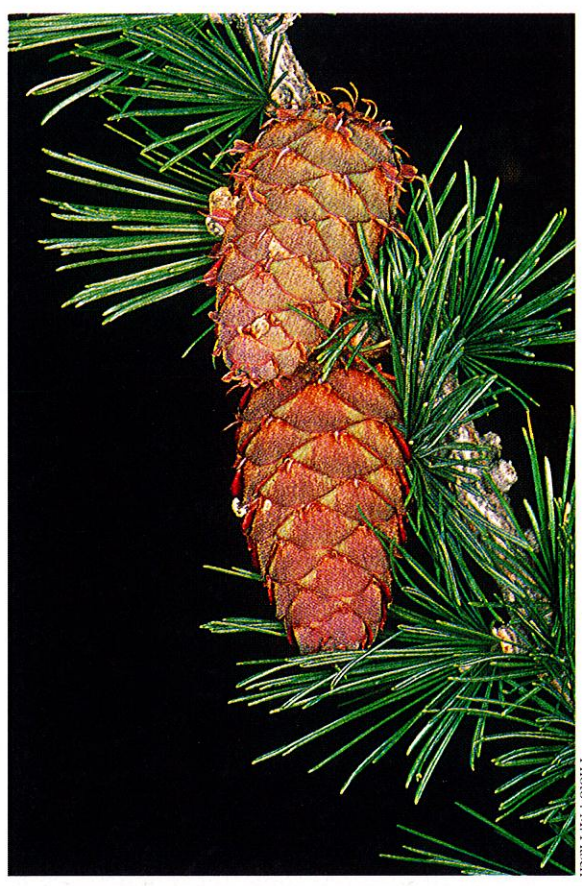

Photo : M. Pisch


Photo : J. Goxcolou

suivies par les arbres. C'est ainsi que pour le chêne, on a pu montrer que tous les peuplements situés à l'ouest d'une ligne Perpignan-Copenhague, étaient issus du refuge Ibérique. Par ailleurs la présence de "patchs" d'une quarantaine de kilomètres de diamètre témoigne des effets de "fondation" résultant d'une dispersion des graines par saut à longue distance par des agents divers (geais [2], voie d'eau, transport anthropique...). Il s'agit là de la première vérification expérimentale de la rapidité à laquelle l'Europe a été recolonisée par les chênes (plus de 500 m. par an) [3]. En collaboration avec les palynologues, l'INRA est en train de construire une carte géographique très dense des variants d'ADN chloroplastique et des pollens fossiles sur l'ensemble de l'Europe avec le soutien de l'Union Européenne. Les voies de recolonisation déduites de ces cartes constitueront des éléments de référence pour d'autres organismes inféodés à l'écosystème "chênaies".

[2] INRA mensuel n°89, pages 28 à 30.

[3] INRA mensuel n°88, page 4.

Le maintien de la diversité génétique : que peut faire le sylviculteur ?

L'action du forestier affecte, tout au long des opérations sylvicoles, les facteurs d'évolution de la diversité par la modification des tailles de population dans les éclaircies et le choix des régimes sylvicoles, par la modification des flux de gènes liée aux décisions d'aménagement. Les effets des pratiques sylvicoles sur l'évolution (niveau et sens) de la diversité génétique restent très largement méconnus. L'INRA a mis en place depuis plusieurs années des dispositifs visant à estimer l'effet d'une intervention sylvicole. La plus sensible reste bien évidemment la régénération naturelle, dont les effets ne sont *a priori* pas prévisibles. Ils peuvent aussi bien contribuer à l'augmenter ou à la diminuer. Les recherches en cours ont pour objectif d'estimer aussi précisément que possible les flux de pollen (migration du pollen ou des graines par recherches de paternité ou de maternité à l'aide de microsatellites) dans les coupes d'ensemencement et leurs effets sur la structuration spatiale de la diversité.

Conclusion

Le rapide tableau qui vient d'être dressé suscite autant d'interrogations scientifiques que d'applications en sylviculture. Il nous révèle, même si la démonstration n'est pas aussi limpide qu'un théorème mathématique, que la diversité élevée, assurée dans les populations actuelles par d'importants flux géniques, permet aux arbres forestiers de répondre très rapidement aux sollicitations extérieures. Il nous montre aussi que l'homme peut tirer profit très rapidement de cette diversité, même sans engager des programmes de sélection artificielle, en valorisant les résultats de la sélection naturelle. Ces résultats ne doivent pas être considérés comme des cautions à une gestion irraisonnée des ressources génétiques que constituent les forêts. Ils engagent au contraire à renforcer les mesures de conservation déjà prises. Enfin, les arbres forestiers sont souvent des espèces qualifiées de "carrier" par les anglo saxons, au sens où ils abritent une richesse biologique importante. La connaissance de leur diversité intraspécifique pourrait donc constituer un indice sur la biodiversité contenue dans l'écosystème. Les résultats acquis sur la diversité des arbres forestiers et l'originalité de leur place dans le monde vivant, ont très rapidement séduit de nouvelles équipes de recherches situées au-delà des instituts traditionnellement impliqués dans les recherches forestières. Plusieurs équipes universitaires et d'instituts à vocation de développement ont engagé des programmes de recherche sur la description et l'évolution de la diversité chez les arbres. On peut donc assister à une accumulation de résultats qui se substitueront très rapidement au tableau qui vient d'être dressé.

Antoine Kremer,
INRA, Laboratoire de Génétique et Amélioration,
Centre de Recherches de Bordeaux,
BP 45 Gazinet Pierreton, 33610 Cestas ■

Pour en savoir plus

• W.T. Adams, S.H. Strauss, D.L. Copes, A.R. Griffin (1992), Population genetics of forest trees. Kluwer academic publishers.
• A. Kremer (1994), Diversité génétique et variabilité des caractères phénotypiques chez les arbres forestiers. Genet. Sel. Evol. 26 : 105s-123s.
• G. Müller-Starck, M. Ziehe (1991). Genetic variation in european populations of forest trees. Sauerländer's verlag.

3 Arbres et forêts : vivre avec les insectes et les micro-organismes

1• Les insectes

La gestion durable des forêts poursuit deux grands objectifs. Le premier est la conservation de la diversité biologique et la préservation à long terme des équilibres géochimiques, de façon à garantir les capacités de réaction du milieu forestier aux évolutions imprévisibles de l'environnement. Le second objectif est le maintien de la forêt dans le cadre économique et social car elle assure des emplois et produit des matériaux utiles à la société, dégageant ainsi les ressources indispensables à son entretien. Or chacun sait que les insectes peuvent commettre des dégâts considérables affectant la survie des arbres ou la production du bois. Mais les insectes occupent également une place prépondérante, quoique souvent méconnue, dans le fonctionnement de l'écosystème forestier.


Photo : A. Delplanque

Graellsia isabellae (femelle).

La définition des paramètres objectifs de gestion durable passe donc nécessairement par une meilleure prise en compte de la place et du rôle des insectes en forêt.

Les insectes et la diversité biologique des forêts

Les insectes, avec plus d'un million d'espèces déjà identifiées (entre 10 et 100 millions restant à décrire), représentent plus de la moitié des espèces vivantes de la biosphère. Le milieu forestier n'échappe pas à la règle, abritant un nombre très important d'espèces d'insectes, représentées chacune par un nombre considérable d'individus. Ainsi plus de 6 000 espèces d'insectes ont été inventoriées en forêt de Fontainebleau, et près de 1 200 Coléoptères différents ont été décrits sur les 300 ha de la forêt de Massane. En Europe, 60% des espèces de papillons seraient forestières. En terme de biomasse, on estime que la part représentée par les insectes en forêt est plus de deux fois supérieure à celle des mammifères et des oiseaux. Bien entendu, tous ces insectes ne sont pas des ravageurs potentiels puisque si le quart des espèces d'insectes forestiers sont bien herbivores, plus de la moitié sont des prédateurs ou des parasitoïdes des insectes capables au contraire de diminuer l'impact des phytophages.

Cette grande diversité semble liée à la complexité du milieu forestier. Composé de différentes strates de végétaux, souvent pérennes, il offre en effet une multitude de niches, d'abris, de microclimats, de ressources alimentaires, disponibles à différentes saisons, que les insectes utilisent pour se développer. De fait, la richesse spécifique des insectes forestiers dépend essentiellement de la nature, de l'abondance et de l'ancienneté

des espèces d'arbres qui structurent l'écosystème. Ainsi, en Europe occidentale, ce sont les chênes, les saules et les bouleaux qui, avec plus de 400 espèces, abritent la plus grande diversité d'insectes, alors que les pins et les hêtres n'en comptent qu'une centaine et les sapins moins de cinquante.

Mais les insectes jouent eux-mêmes un rôle important dans l'évolution de la diversité végétale des forêts. Sans les insectes, la pollinisation et donc la reproduction des deux tiers des espèces ligneuses ne seraient pas assurées. À l'inverse, certains ravageurs détruisent plus de la moitié des fleurs de chênes, d'autres la totalité des cônes de mélèze. Les insectes influent donc sur les échanges génétiques et les capacités de dissémination des arbres, agissant sur la diversité infra-spécifique des végétaux. Par ailleurs, les insectes ravageurs pratiquent une utilisation sélective des arbres qui peut modifier le processus de succession naturelle des essences forestières. Ainsi, en détruisant les sapins adultes, la Tordeuse des bourgeons crée des trouées dans le couvert et accélère le renouvellement des essences de lumière. À l'inverse, les pullulations de Tordeuse du mélèze provoquent une importante mortalité des jeunes pins cembro du sous-étage, ralentissant la succession naturelle du mélézin pur vers la forêt mélangée de pins et de mélèze. L'impact des insectes s'exerce donc aussi sur la diversité inter-spécifique des végétaux forestiers.

Photo : J. Nioré

Tordeuse verte.

Les insectes et le fonctionnement biogéochimique des forêts

Les insectes n'ont pas seulement un impact sur la structure mais aussi sur le fonctionnement global des écosystèmes forestiers car leur développement n'est pas sans effet sur les microclimats et le cycle des nutriments, qui conditionnent à leur tour la croissance des végétaux.

Ainsi la défoliation des arbres par les insectes phyllophages peut modifier pendant plusieurs mois le microclimat d'un peuplement en augmentant les flux d'air, la pénétration des rayons lumineux et de l'eau de pluie qui ne sont plus interceptés par le couvert. Plus graves encore peuvent être les conséquences d'un vaste dépérissement comme ce fut le cas dans le Colorado où une attaque de scolytes provoqua la mort de plus de 50 000 ha de conifères, au coeur même d'un bassin hydrographique. La réduction conjointe de l'interception et de la transpiration de l'eau par les arbres provoqua alors un accroissement du ruissellement et de l'infiltration qui augmenta pendant près de 25 ans le débit des cours d'eau dans la région.

Quand la circulation de l'eau augmente ainsi en forêt, une quantité importante de nutriments peut être exportée du système, affectant la croissance des arbres. Mais l'action des insectes semble, en moyenne, plutôt bénéfique pour la fertilité des sols forestiers. En effet, les phyllophages accroissent la chute de litière, celle-ci est ensuite fragmentée par les insectes du sol, favorisant finalement le recyclage des nutriments. De plus les dépouilles ou déjections d'insectes constituent un apport non négligeable de minéraux aisément mobilisables pour la croissance des arbres. Après une défoliation de chênes, on a pu ainsi mesurer que 40 à 70% des dépôts d'azote et de phosphore dans le sol provenaient directement des insectes.

Les insectes, leurs dégâts et le maintien des fonctions économique et sociale des forêts

L'impact le plus visible des insectes en forêt reste néanmoins les nombreux dégâts qu'ils infligent aux arbres, affectant tous les processus physiologiques, la croissance, la qualité du bois ou la régénération naturelle. Des ravageurs qualifiés d'endémiques attaquent en permanence les peuplements forestiers induisant des pertes de production limitées mais continues. Le taux de défoliation annuel imputable aux insectes varie par exemple



Photo : C. Demolin

Processionnaire du pin.



Photo : A. Delplanque

Graellsia isabellae (mâle).

de 5 à 15%. Mais les pires dégâts résultent des pullulations, quelles soient cycliques ou épisodiques. Les canadiens ont pu évaluer que, depuis le début du siècle, la Tordeuse des bourgeons du sapin avait attaqué plus de 250 millions d'hectares. Les scandinaves imputent aux scolytes la perte de 7 millions de m^3 de bois d'épicéa en l'espace de 10 ans. En France même, la quasi totalité des forêts de pin maritime des Maures et de l'Estérel (120 000 ha) ont disparu à la suite d'une pullulation de cochenilles. La processionnaire du pin entraîne des dégâts cycliques et réguliers sur les pinèdes du sud de l'Europe. Certains insectes peuvent aussi nuire à la santé des usagers de la forêt. Ainsi les poils des chenilles processionnaires provoquent souvent de graves urtications, voire de véritables phénomènes allergiques. Le maintien de la fonction économique et sociale de la forêt passe donc par une nécessaire lutte contre les insectes ravageurs. Mais pour répondre aux objectifs de gestion durable, il convient de développer des méthodes respectueuses de l'environnement c'est-à-dire qui ne remettent en cause ni la diversité biologique ni l'équilibre fonctionnel de l'écosystème.

Des méthodes de lutte contre des insectes

Dans ce contexte, l'emploi des insecticides en forêt est à déconseiller. Ces produits, souvent peu sélectifs, peuvent en effet induire une pollution des sols et des nappes phréatiques, entraîner la destruction des ennemis naturels et conduire à terme à l'apparition de résistances chez les insectes visés. L'utilisation de produits plus ciblés pourrait réduire ces risques mais le marché en forêt est trop limité pour rentabiliser leur coût de développement. L'usage des insecticides en forêt reste donc réservé à quelques cas particuliers, comme certains défoliateurs. L'effort est alors continu pour améliorer les formulations et ajuster les dates de traitements afin de limiter des doses d'utilisation.

L'un des objectifs prioritaires de l'entomologie forestière à l'INRA reste donc la mise au point de méthodes de lutte préventive, fondée sur l'utilisation ou le renforcement du potentiel de résistance naturelle des arbres, des peuplements ou des massifs forestiers.

• La première voie de recherche concerne la **sélection d'arbres résistants** aux attaques d'insectes. Elle s'appuie sur l'importante variabilité intra-spécifique des essences forestières qui conduit à la coexistence, en forêt, d'arbres présentant des sensibilités variées. Ainsi, les recherches menées à l'INRA ont montré que les chênes subissent des attaques plus ou moins graves de Tordeuses vertes selon notamment leur précocité de débourrement et les peupliers plus ou moins de défoliations de la part des chrysomèles selon la pilosité de leur surface foliaire. De même, les conifères seraient plus ou moins attractifs pour les xylophages selon la composition en terpènes de leur résine et leur capacité de défense dépendrait de leur aptitude à synthétiser certains polyphénols. Ces caractères, s'ils sont soumis à un contrôle génétique suffisant et restent compatibles avec les objectifs de production de bois, peuvent être utilisés pour améliorer la résistance individuelle des arbres. Mais les principes de gestion durable imposent que les résistances, obtenues par sélection ou transgénèse, ne soient plus seulement utilisées mais véritablement gérées à leur tour, en intégrant trois considérations: préserver les chances de trouver les sources de résistances utiles à l'avenir, ce qui passe par le maintien de la diversité biologique des essences forestières et

Graellsia isabellae. Chenille au dernier stade sur pin sylvestre.



Photo : A. Delplanque

donc par une politique de conservation des ressources génétiques ; utiliser avec parcimonie les résistances actuelles pour ne pas provoquer l'apparition, avant la fin du cycle forestier, d'insectes capables de contourner ces défenses ; enfin contrôler l'innocuité des résistances pour les insectes non cibles afin de pas perturber l'équilibre de l'écosystème.

• La recherche de méthodes de lutte préventive concerne également **la gestion des peuplements forestiers**. De nombreux exemples illustrent en effet le lien entre les choix sylvicoles et les risques d'attaques d'insectes. L'inadaptation d'une essence à une station peut conduire ainsi à de graves problèmes sanitaires comme en témoignent les pullulations de pucerons sur des épicéas installés sur sols humides. De même, les jeunes peuplements de pins sont plus attaqués par les chenilles processionnaires lorsqu'ils sont plantés à faible densité et la fertilisation accroît leur sensibilité à la tordeuse des pousses. L'éclaircie des peuplements de pins réduit le risque d'infestation par les Scolytes alors que leur élagage augmente le taux d'attaque par la Pyrale des troncs. L'adaptation des techniques sylvicoles et des décisions de gestion aux contraintes sanitaires constitue donc une voie prometteuse par sa simplicité et son adéquation aux principes de gestion durable des forêts.

• Une troisième façon de prévenir les pullulations d'insectes consiste à **renforcer ou rétablir les mécanismes de régulation trophique** existant en forêt. De nombreuses espèces en effet consomment ou parasitent les insectes ravageurs. Mais pour les essences forestières introduites, il arrive que certains déprédateurs soient importés sans leurs ennemis naturels et développent alors des épidémies, comme ce fut le cas pour le puceron du cèdre en France. L'acclimatation de parasites récoltés dans l'aire d'origine de la plante peut alors conduire à un rétablissement de l'équilibre trophique comme l'indique la réduction des niveaux d'infestation du puceron du cèdre après introduction depuis le Maroc d'un de ses hyménoptères parasites. Il existe par ailleurs une crainte que les forêts monospécifiques soient particulièrement exposées aux risques entomologiques. Les insectes phytophages seraient en effet favorisés dans ces écosystèmes offrant des ressources alimentaires abondantes et accessibles mais aussi une moindre régulation par des ennemis naturels peu nombreux et peu variés. Une expérience originale est menée par l'INRA, en Aquitaine, pour analyser ces processus en intégrant des parcelles de feuillus au sein de l'écosystème du pin maritime. L'objectif est double : fragmenter l'habitat des insectes ravageurs pour compliquer la localisation des arbres hôtes ; apporter aux parasites et prédateurs de nouvelles niches écologiques susceptibles d'assurer leur développement, de façon à ce qu'ils soient assez nombreux pour contrôler efficacement les populations de ravageurs.

Conclusion

Un grand nombre d'espèces d'insectes sont donc indispensables au bon fonctionnement de la forêt alors que quelques-unes menacent sa rentabilité. Mais la préservation des unes et la lutte contre les autres ne sont pas incompatibles : elles doivent procéder d'une même analyse fonctionnelle de l'écosystème, elles doivent ensuite ne pas être oubliées quand s'élaborent les plans de gestion et d'aménagement.

Hervé Jactel,
INRA, Entomologie forestière,
Centre de Recherches de Bordeaux,
BP 45 Gazinet Pierreton, 33610 Cestas ■

Pour en savoir plus

• Barthod, C. 1994. Sylviculture et risques sanitaires dans les forêts tempérées. Revue Forestière Française, 6, 609-628.
• Chauvet, M., & Olivier, L. 1993. La biodiversité, enjeu planétaire. Éditions Sang de la Terre, Paris, 413 pp.
• Speight, M.R., & Wainhouse, D. 1989. Ecology and Management of Forest Insects. Clarendon Press, Oxford, 374 pp.

3 Arbres et forêts : vivre avec les insectes et les micro-organismes

2• Les micro-organismes

On estime en France que 2 500 ha de forêt doivent être reconstitués chaque année du fait d'accidents phytosanitaires et que 150 000 ha subissent chaque année des pertes de croissance imputables aux ravageurs et aux parasites, sans pour autant que la pérennité de ces peuplements soit remise en cause. En cas d'introduction d'un parasite exotique, les conséquences peuvent être beaucoup plus graves : graphiose de l'orme, chancre du châtaignier.

Les arbres côtoient en permanence des micro-organismes dont les rôles sont bien distincts. Certains sont bénéfiques : champignons mycorhiziens ou antagonistes de la flore pathogène du sol, bactéries fixatrices de l'azote ou auxiliaires de la mycorhization. D'autres éliminent les débris végétaux et en recyclent les éléments. Enfin certains sont parasites des arbres. Parmi ceux-ci les plus redoutables sont les champignons auxquels s'ajoutent quelques bactéries et virus.



Photo : B. Marçais

Touffes de *Collybia fusipes* au pied d'un chêne dépérissant.

Le développement des populations de ces parasites dépend presque toujours du climat. Toutefois les dégâts de grande ampleur résultent le plus souvent d'un facteur déclenchant. Celui-ci peut être un accident climatique (souvent la sécheresse) qui va rendre sensible l'arbre à des parasites opportunistes. Les autres facteurs déclenchants résultent souvent d'une erreur humaine : introduction d'un nouveau parasite, choix d'une essence mal adaptée à la station, artificialisation exagérée (réduction de la diversité génétique, sylviculture trop favorable aux parasites).

La contribution des recherches en pathologie forestière à la gestion durable des forêts est double : économique et écologique. Dans le premier cas le but est d'empêcher les affaiblissements, de réduire les pertes et les mortalités afin d'obtenir un bois de qualité en quantité suffisante. Cet objectif a aussi une dimension qualitative : minimiser la fréquence des défauts des tiges (déformations, chancres, altération) bien que ceux-ci ne mettent guère en péril le peuplement ou les individus qui le composent. Le second objectif vise à maintenir la diversité des peuplements et la diversité au sein de chaque essence. Certes la disparition des arbres sensibles peut sembler constituer une évolution favorable mais cette disparition peut s'accompagner de la perte d'autres caractères utiles ou favorables ; elle peut même constituer une menace sur la survie d'une essence si les individus résistants n'en constituent qu'une faible proportion.

La pathologie forestière se situe à l'interface de deux diversités : celle du peuplement et de l'essence et celle des parasites. Ces diversités peuvent être analysées à deux niveaux : inter et intraspécifique.

Variabilité interspécifique

Les essences forestières.

Les espèces forestières appartenant à un même genre peuvent cohabiter dans la même région (voire dans la même parcelle) ou au contraire être distinctes sur le plan écologique. Entre espèces d'un même genre il existe des différences de comportement envers les maladies. Il résulte, par exemple des travaux des équipes INRA d'Angers, Orléans et Nancy, que chez les peupliers européens et américains on peut trouver des espèces assez résistantes envers les maladies foliaires (rouilles à *Melampsora*, chancre à *Xanthomonas populi*). Parfois le meilleur comportement d'une espèce envers un parasite résulte d'abord de son aptitude à résister à une autre adversité. Ainsi une recherche multidisciplinaire conduite à Nancy et à Clermont-Ferrand a montré qu'après la sécheresse de 1976, l'infection moindre des racines du chêne sessile (comparé au pédonculé) par des agents de pourridié résultait d'une meilleure adaptation de cette essence à l'abaissement de la nappe (système racinaire plus profond).

La présence, dans un peuplement forestier, d'arbres appartenant à des genres différents contribue en général à un meilleur état sanitaire. Il est rare en effet qu'un même parasite soit très polyphage. En peuplement mélangé, l'inoculum émis par un parasite des organes aériens sera en partie perdu en se déposant sur des arbres non-hôtes qu'il ne pourra infecter. Certains parasites vasculaires (graphiose de l'orme) ou d'altération (*Heterobasidium annosum* sur l'épicéa) se propagent à la faveur de greffes de racines entre arbres voisins. Or ces greffes ne peuvent relier que des arbres appartenant au même genre et sont plus fréquentes si ces arbres sont de la même espèce. Cette contribution favorable de la diversité est contredite si le parasite exige deux hôtes pour boucler son cycle, cas limité aux rouilles. Ainsi le *Melampsora pinitorqua*, rouille courbeuse du pin, doit alterner entre le tremble et le pin. Toutefois les études conduites à Bordeaux montrent qu'il faut un bon synchronisme entre le parasite et le stade de réceptivité du pin pour que ce risque soit effectif.

Photo : C. Delatour

Coupe d'un tronc d'épicéa attaqué par *Heterobasidium annosum*.

Les parasites

Du côté du parasite, la diversité d'espèces aptes à infecter le même hôte existe aussi. Trois scénarios sont possibles. Dans le premier il existe une compétition entre les parasites, sans avantage évident pour l'arbre. Ainsi sur les feuilles de peuplier, la contamination printanière par *Marssonina brunnea* réduira le feuillage disponible pour une infection ultérieure par une rouille. Dans d'autres cas, la présence de plusieurs parasites provoquera un enchaînement très dommageable : les parasites foliaires peuvent affaiblir un arbre qui devient alors sensible à des parasites des écorces ou des racines. Dans le troisième cas, la diversité de la microflore profite à l'arbre par le jeu d'une compétition entre agents pathogènes et non pathogènes. Ainsi il a été montré que des sols riches en certains *Fusarium* non pathogènes limitaient les "fontes" de semis dues à des *Fusarium* pathogènes. La colonisation des souches de résineux par *Phlebiopsis gigantea* (champignon lignivore, non pathogène) les rend indisponibles pour *Heterobasidium annosum*. Chez les rouilles du peuplier nous avons observé plusieurs fois l'intervention d'un hyperparasite (*Eudarluca salicis*) mais sa contribution à la régulation de la population du parasite n'est pas flagrante.

Pour résumer, les peuplements composés d'essences différentes semblent être plus avantageux dans la mesure où ils constituent un frein à la dissémination des parasites à la différence des peuplements composés d'une seule espèce. La diversité spécifique chez le parasite se solde pour l'arbre par un bilan nul ou négatif. Ce bilan ne devient positif qu'en cas d'interaction avec

Variabilité du pouvoir pathogène de *Melampsora larici-populina* (agent de la rouille foliaire) et de la résistance du peuplier.



Photo : J. Pinon

des micro-organismes anodins pour l'arbre mais en compétition avec les parasites.

Variabilité intraspécifique

L'arbre forestier

La diversité intraspécifique chez les espèces forestières est bien connue, en particulier pour celles faisant l'objet d'un effort d'amélioration pour la résistance aux maladies. Cette approche concerne actuellement plusieurs essences à l'INRA et tout particulièrement le peuplier et le mélèze. Chez l'hôte, des différences de sensibilité aux parasites s'expriment à divers niveaux infraspécifiques : sous-espèce ou race, provenance, famille et individu. Ces différences s'expriment assez clairement envers les parasites foliaires, corticaux et vasculaires. Les collaborations entre améliorateurs et pathologistes d'Orléans et de Nancy ont permis de développer des tests fiables de détection de ces résistances. Ces détections deviennent de plus en plus précoces par la mise au point de tests de laboratoire, l'accès à des marqueurs moléculaires ou biochimiques. Progressivement le déterminisme génétique de ces résistances est élucidé et il devient possible d'accéder aux gènes impliqués. Nous savons à présent que pour résister les peupliers utilisent deux stratégies : soit une résistance complète qui semble gouvernée par un très petit nombre de gènes forts, soit une résistance partielle qui repose sur des gènes plus nombreux mais dont les effets sont moins puissants. Les premiers pourraient être impliqués dans une stratégie de reconnaissance précoce de l'agresseur qui serait aussitôt neutralisé. Les seconds ne s'opposeraient pas à l'envahissement des tissus de l'hôte mais ralentiraient la progression du champignon et réduiraient son aptitude à sporuler. Cette distinction entre des mécanismes n'est pas neutre en terme de durabilité de la résistance. Elle doit être confrontée à la diversité infraspécifique des parasites (races physiologiques). De plus ces deux stratégies ne s'excluent pas systématiquement.

Les parasites

• **La variabilité du pouvoir pathogène.** La diversité au sein d'une espèce parasite est de mieux en mieux établie. Elle est caractérisée par la spécificité parasitaire qui permet de distinguer des entités généralement indistinctes morphologiquement. Grâce aux recherches conduites à Clermont-Ferrand, il a été montré que l'Armillaire était composée de plusieurs espèces bien séparées, dont, en Europe, deux seulement sont franchement pathogènes : *A. ostoye* sur les résineux et *A. mellea* sur les feuillus. Au sein d'une espèce parasite, la forme spéciale (chez les champignons) ou le pathovar (chez les bactéries) infecte seulement certains genres ou certaines espèces de l'hôte. La race physiologique infecte spécifiquement tel ou tel clone de l'hôte. Depuis une quinzaine d'années de nombreuses races "physiologiques" ont été mises en évidence à Nancy chez *Melampsora larici-populina* et *M. allii-populina*, agents de la rouille foliaire du peuplier. Certaines races peuvent contourner la résistance complète d'un clone de peuplier alors que d'autres pourront défaire celle d'un autre clone qui ne met pas en jeu les mêmes gènes de résistance. Ainsi un individu hôte peut sembler complètement résistant mais devenir très sensible quand se développe la race capable de l'attaquer. La confrontation des gènes de résistance de l'arbre et de ceux du pouvoir pathogène du parasite (virulence) s'exerce, dans ce cas, à une échelle très fine qui évoque un système gène pour gène. Actuellement ce type d'interaction n'est connu que chez les peupliers dont un parent au moins (*Populus deltoides*) est d'origine nord-américaine et n'a donc pas évolué avec ces parasites européens. À l'inverse, seules des interactions quantitatives, souvent subtiles, ont été décelées, pour l'instant, entre l'hôte indigène (*P. nigra*) et les races du parasite. En cas d'évolution des populations de races, la résistance, bien que partielle, de ces *P. nigra* est nettement plus durable que celle des hybrides incluant *P. deltoides*.

• **La dissémination.** Le second niveau de diversité étudié chez le parasite est celui que constitue l'individu (la souche, l'isolat). L'accès à l'individu est essentiel pour connaître les modes de dissémination de certains parasites. Chez les Basidiomycètes, les groupes de compatibilité somatique peuvent être reconnus en confrontant *in vitro* deux isolats du parasite. Cette approche, qui ne peut certes séparer tous les individus, offre une première approche de la variabilité infraspécifique. Récemment les études de biologie moléculaire (dont le polymorphisme de l'ADN ribosomique) ont permis d'accomplir des progrès importants. Ainsi à Nancy, en combinant les deux méthodes précitées, il a pu être établi que la contamination des racines de chênes par *Collybia fusipes* était souvent le fait d'un seul individu dont la dissémination est aérienne. À Lyon, les méthodes les plus récentes de biologie moléculaire ont permis de reconnaître individuellement les souches de *Xanthomonas populi* (agent du chancre bactérien du peuplier) et d'établir le faible pouvoir de dissémination de cet agent.

Conclusion

Tant pour des raisons environnementales qu'économiques, la lutte suppressive (fongicides) n'est pas envisagée en forêt à l'exception des pépinières ou de traitements ponctuels pour éviter une catastrophe. Quel que soit le degré d'artificialisation des peuplements forestiers, assurer l'adéquation essence d'arbre-station forestière demeure une consigne prioritaire. Elle permet d'atténuer les effets des parasites de faiblesse [1] envers lesquels il n'y a guère d'autre moyen de lutte.

Les connaissances sur la diversité des essences et de leurs parasites ont fortement progressé à l'INRA ces dernières années et l'avènement de la biologie moléculaire accélère ce processus. Ces connaissances permettent de mieux connaître les bases de la résistance de l'hôte et celles du pouvoir pathogène. Elles débouchent sur des progrès dans l'amélioration et le choix des génotypes dont la résistance sera la plus durable (résistances peu ou pas contournables), et dont la gestion peut à présent tenir compte de la diversité du parasite et de ses populations. Les connaissances sur la diversité du parasite permettent aussi de comprendre leur dissémination et donc d'édicter à terme des règles de gestion des peuplements atteints. Enfin, l'estimation précoce des risques dans des peuplements très artificialisés (peupleraies) devient une réalité.

Le domaine le moins bien maîtrisé est celui qui consiste à créer *de novo* des peuplements complexes. L'apport de la pathologie repose alors sur la connaissance des modes de dissémination des parasites et de leur gamme d'hôtes pour définir la structure du peuplement la plus défavorable aux parasites majeurs. Mais il restera à trouver un juste équilibre entre cette structure et les phénomènes de compétition entre arbres qui risquent d'en résulter.

Jean Pinon,
INRA, Écosystèmes forestiers, Pathologie forestière,
Centre de Recherches de Nancy,
57280 Champenoux ■

[1] Qui se développent lorsque les arbres sont en état de faiblesse.

Pour en savoir plus

• C. Delatour, 1984 - Mycoses forestières et résistance écologique. C.R. Acad. Agric. Fr. 70 (7), 871-880.
• F. Lieutier, J. Pinon et C. Delatour, 1994. Place des agents biotiques dans les dépérissements forestiers. Revue Forestière Française, 5, 418-421.
• J. Pinon, 1986 - La sélection pour la résistance aux maladies. Revue forestière francaise, numéro spécial, 1986, 228-233.
• J. Pinon, 1986 - Les maladies de faiblesse en plantation. Revue forestière française, 1986 ,38, 324-330.
• J. Pinon, 1995 - Variabilité des rouilles du peuplier et évolution de leurs populations. Conséquences sur les stratégies de lutte. Colloque État et perspectives de la populiculture, Académie d'Agriculture, 29-30 mars, Nantes. CR Acad. Agric. Fr., 81, 3, 99-109.

4 Les peuplements hétérogènes, un objectif idéal ?

Les forêts hétérogènes sont souvent très présentes dans l'imaginaire des hommes que nous sommes, comme en témoigne par exemple le succès de Bambi. L'intérêt que porte le public, et les hommes en général, au maintien de massifs forestiers hétérogènes est donc très important et parfois exprimé avec vigueur.
Il y a également convergence entre ce lien affectif et le sentiment diffus que l'hétérogénéité semble être la règle dans la nature. Cet intérêt repose-t-il également sur un fondement rationnel ?



Photo : T. Boujard, F. Meunier, M. Pascal

Végétation xérophytique, bombement granitique. En arrière plan, la forêt tropicale primaire vue de l'Inselberg des Nouragus - Guyane.

Rôle et importance des forêts hétérogènes

La plupart des forêts régulières (une espèce, un âge, une structure simple avec canopée fermée) sont le produit de la sylviculture, que ce soit en forêt tempérée ou tropicale. En revanche, les forêts peu remaniées par l'homme sont souvent diversifiées, que ce soit en espèces ou en âges. Mais une hêtraie européenne atlantique, par exemple, est une formation naturelle rarement accompagnée d'autres espèces. L'association entre d'un côté "simplicité" et "caractère artificiel", d'un autre, "hétérogénéité" et "caractère naturel" n'est donc pas d'une telle évidence.

La diversité est souvent associée à la forêt tropicale. S'il est exact que cette dernière est parfois exubérante, la forêt tempérée n'est pas toujours monotone. Les forêts des Appalaches, dans l'est de l'Amérique du Nord, des chaînes côtières des rivages pacifiques de l'Amérique du Nord, de la Chine et du Japon et plus encore de l'hémisphère sud au Chili et en Nouvelle Zélande peuvent rivaliser en indice de diversité avec la plupart des forêts tropicales. Il se trouve que, par le fruit de l'histoire géologique et climatique, la flore tempérée européenne a été très appauvrie lors des dernières glaciations. Mais la forêt méditerranéenne, toute proche, est déjà naturellement très hétérogène.

Le maintien de cette hétérogénéité, synonyme de richesse, est au coeur de la notion de développement durable.

Le "développement durable" est un concept assez récent, qui vient prolonger et enrichir celui plus ancien de "rendement soutenu" sur lequel il s'appuie. Le rendement soutenu consiste à récolter le bois de la forêt sans mettre en péril l'avenir du capital. Il était alors implicite que le maintien du potentiel ligneux garantissait le maintien du potentiel biologique. Le développement durable, en incluant le rendement soutenu, l'enrichit par une recherche explicite du maintien du potentiel biologique tout en intégrant les fonctions économiques, écologiques et sociales de la forêt.

Il se trouve que, en forêt tempérée notamment européenne, les essences qui sont à la base de l'hétérogénéité des peuplements, notamment les feuillus précieux, sont également celles dont le bois est de la quali-

té la plus prisée dans les biens de consommation à base de bois : qualités mécaniques du bois de frêne, esthétiques du merisier, musicales de l'érable ondé. Les premiers skis, par exemple, étaient tous fabriqués avec du bois de frêne. Ces espèces ont donc à la fois une haute valeur écologique et économique.
C'est dire que les forêts hétérogènes, par l'intégration nécessaire entre qualités économiques, sociales et écologiques, sont au coeur de la problématique de la gestion durable des forêts.


Photo : T. Boujard, F. Meunier, M. Pascal

Camp des Nouragus (ECOTROP-CNRS). Passerelles d'accès à la canopée - Guyane.

Diversité et stabilité

Très souvent, dans un écosystème, la durabilité est associée à la diversité et à la complexité, partant de l'idée simple, et peut-être simpliste, qu'il est utile de ne pas mettre tous ses oeufs dans le même panier.
Or, la réalité est loin d'être aussi simple. Des modèles théoriques des années 1970 montrent que l'instabilité peut être associée à la complexité. Prenons l'exemple d'un écosystème animal, terrestre ou lacustre. Il est habituel de ranger les espèces dans différentes catégories, comme les herbivores, les carnivores, ou encore des prédateurs et des proies. Toutes les relations entre espèces ne sont pas fortes et intenses. Au contraire, bien des travaux d'écologie animale sont centrés sur les chaînes trophiques, qui, comme la carte routière d'un pays, indiquent les principales interactions entre espèces animales. Certaines relations sont privilégiées, et d'autres plus secondaires. On peut alors montrer qu'un écosystème est souvent instable, donc peu durable car très sensible aux perturbations extérieures, si toutes les relations sont importantes. Une grande partie de la stabilité des écosystèmes semble due à une hiérarchisation des interactions entre individus et espèces, entre relations importantes, relations secondaires ou même absence de relation. Cette relation surprenante entre stabilité et complexité est l'une des pistes majeures de recherche en écologie où les forêts hétérogènes ont un rôle important à jouer.
Remarquons également que, dans les forêts hétérogènes tempérées, le maximum de diversité est souvent obtenu dans un stade transitoire post-pionnier, à base de chênes, érables, frênes, merisiers et cette dernière s'appauvrit souvent dans l'évolution vers une formation plus stable qu'est la hêtraie. Les relations entre diversité, stabilité sont donc complexes, et leur compréhension est en plein développement.

Amélioration et régénération

En sylviculture de forêt régulière, il est habituel de distinguer une phase de régénération et une phase d'amélioration. Ces deux phases sont clairement séparées dans le temps et se succèdent au rythme des révolutions. L'espace forestier est partagé, presque quadrillé, en unités de gestion où les opérations sont planifiées soit en régénération, soit en amélioration.
La structure des forêts hétérogènes est plus complexe : des tâches de régénération peuvent être intimement mêlées, dans l'espace, à des peuplements de maturités différentes. On ne peut plus distinguer aussi clairement des phases de la vie d'un peuplement où toutes les opérations sont individualisées : il faut gérer ces forêts en associant amélioration, opération au service des arbres mûrs et régénération, opérations au service des arbres jeunes. La maîtrise de ce mélange de deux phases de logiques biologiques très différentes dans une seule et même unité de gestion est un enjeu important pour les années à venir.

Modélisation

La modélisation est une des façons d'approcher la connaissance de la dynamique des peuplements forestiers, qu'ils soient réguliers ou hétérogènes. La modéli-

Vue de la vigie de La Verdière.



Photo : © C. Nouals - CEMAGREF

sation des peuplements hétérogènes est évidemment plus complexe que celle des peuplements réguliers, bien établie. Elle a commencé il y a plusieurs dizaines d'années, notamment en Amérique du Nord et en Scandinavie. La principale évolution qu'a impliqué un intérêt pour les forêts hétérogènes est la nécessité de s'intéresser aux arbres autant qu'aux peuplements.

En effet, aussi curieux que cela puisse paraître, lorsqu'une structure est homogène, il y a confusion entre les échelles locales et les échelles globales. C'est par exemple le cas de systèmes simples en physique comme les cristaux ou les écoulements laminaires, à faible vitesse, comme dans un canal. Les structures observées sont alors souvent invariantes par changement d'échelle et un même modèle peut décrire à la fois les structures globales et locales au voisinage d'un point, à un facteur d'échelle près. Il en est de même pour les forêts régulières : un modèle de croissance permet de simuler à la fois, avec les mêmes équations, l'évolution d'un peuplement et celle de l'arbre moyen. Tous les arbres peuvent être considérés comme des arbres moyens du peuplement, à quelques fluctuations près. Le nombre de variables nécessaires à la connaissance du peuplement est faible et les modèles simples.

Il en est tout autrement pour les forêts hétérogènes : il est alors nécessaire de distinguer au minimum une échelle "arbre" et une échelle "peuplement". Par exemple, la notion d'espèce a un sens à l'échelle de l'arbre, parfois d'un groupe d'arbres mais pas à celle d'un peuplement entier s'il est mélangé. Pour cette raison, les modélisateurs ont raffiné leurs outils en développant des modèles à ces deux échelles. Ils suivent en cela la démarche des physiciens qui distinguent également plusieurs échelles quand ils s'intéressent à la modélisation de structures hétérogènes, comme les alliages ou les écoulements turbulents. Une voie prometteuse de progrès est certainement à portée si le rapprochement esquissé entre disciplines biologiques (connaissance de la forêt) et physiques (modélisation de milieux hétérogènes) peut être fructueuse. Il est encore trop tôt pour évaluer si la complexité des forêts hétérogènes peut se ramener à un niveau raisonnable compatible avec les outils de simulation qui sont numériquement et conceptuellement maîtrisés, bien que beaucoup d'espoirs soient mis dans cette direction.

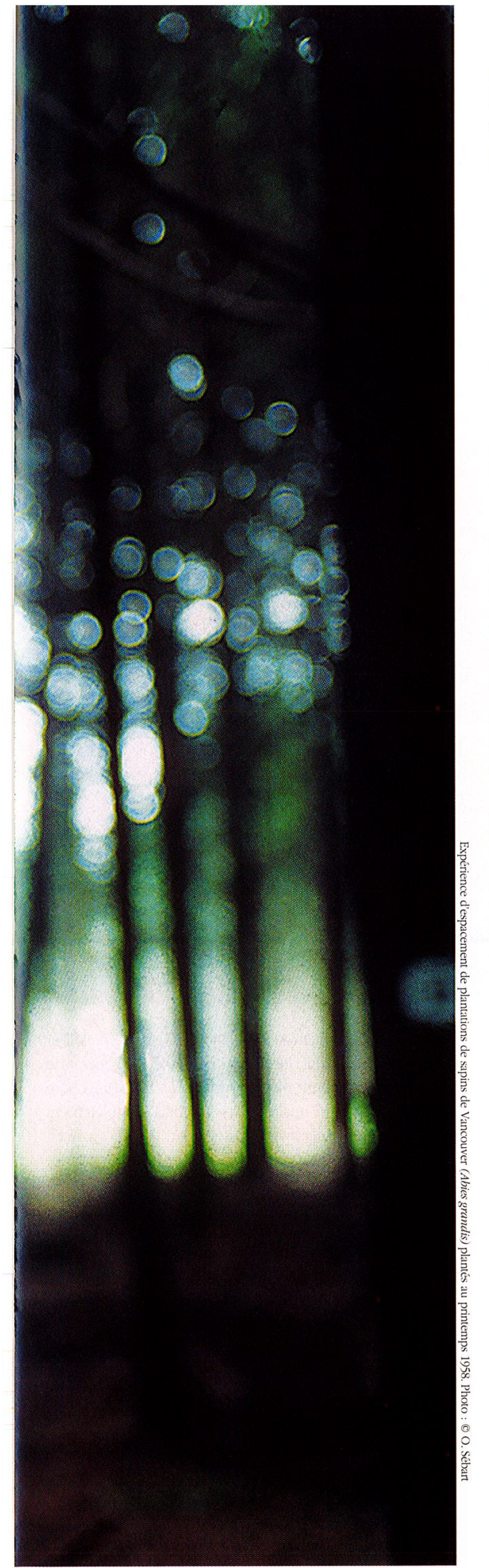
La plupart des modèles acceptés par la communauté scientifique reposent soit sur une base empirique, par ajustement de courbes à des nuages de points issus de mesures dans des placettes permanentes ou semi-permanentes, ou une base plus fonctionnelle, où l'accent est mis sur la compréhension et la modélisation des processus physiologiques qui sont à la base du métabolisme de la croissance, comme l'assimilation chlorophyllienne, la consommation en eau, la participation au cycle de l'azote et des nutriments, ... Tous ces modèles sont bien établis et ont fait leurs preuves pour les peuplements réguliers et sont en plein développement pour les peuplements hétérogènes.

Alain Franc,
ENGREF, Mathématiques appliquées et Informatique,
19, avenue du Maine, 75732 Paris cedex 15 ■

Pour en savoir plus

• Claude Allegre, 1993. Écologie des villes, écologie des champs, Paris, Fayard, coll. Le temps des sciences.
• Robert Barbault, 1994. Des baleines, des bactéries et des hommes, Paris, Odile Jacob.
• FAO, 1994. Le défi de l'aménagement durable des forêts : quel avenir pour les forêts mondiales ?
• Christian Levêque, 1994. Environnement et diversité du vivant, Paris, Cité des sciences et de l'industrie.


14



Expérience d'espacement de plantations de sapins de Vancouver *(Abies grandis)* plantés au printemps 1958. Photo : © O. Sébart

Dynamique des forêts et des peuplements

Les écosystèmes forestiers sont des systèmes dynamiques dont l'évolution est conditionnée par des facteurs naturels et humains directs (sylviculture) ou indirects (CO_2, dépôts azotés, ...). Il est particulièrement important de pouvoir appréhender cette dynamique des peuplements. Nous avons choisi d'illustrer ces aspects à l'aide de deux exemples.

Le premier traite des recherches sur la modélisation et la simulation de la croissance des peuplements en fonction de la sylviculture (c'est-à-dire la conduite des peuplements) appliquée.

Le deuxième met l'accent sur l'un des résultats les plus marquants de la recherche forestière, à savoir la mise en évidence d'une augmentation considérable de la productivité des écosystèmes forestiers dans l'hémisphère nord. Ce phénomène n'est pas sans conséquence sur la gestion forestière elle-même , mais aussi probablement sur la durabilité des écosystèmes forestiers.

1 La conduite des peuplements forestiers

Dans la tradition forestière européenne, maintenir l'état boisé est fondamental ; c'est pourquoi les gestionnaires forestiers consacrent beaucoup de temps et d'énergie à réussir la régénération de leurs peuplements, selon diverses méthodes qui dépendent des objectifs assignés. La plus importante des opérations culturales est la coupe d'éclaircie. La sylviculture est ainsi une activité peu intensive, notamment en ce qu'elle ne réclame que peu d'intrants de nature chimique. Pourtant, les paysages forestiers que nous avons sous les yeux sont profondément artificiels. Ce paradoxe apparent provient d'abord de la très longue durée de la dynamique forestière. En raison de cette caractéristique de durée, le forestier doit être capable d'anticiper l'évolution des peuplements, notamment par des méthodes de simulation de la naissance, de la croissance et de la mort des arbres ; celle-ci peut être naturelle ou accidentelle : maladies, tornades, chablis ou simplement compétition entre arbres pour la lumière ou les ressources du sol, dans cette société très hiérarchisée qu'est la forêt.


Photo : M. Pitsch

La sylviculture ou comment régénérer et façonner les forêts

Par "sylviculture", on entend l'ensemble des choix généraux et des pratiques particulières adopté et mis en œuvre par les forestiers pour cultiver une parcelle de forêt.

Les choix généraux concernent la stratégie adoptée pour régénérer la parcelle ; deux grandes options sont possibles :

- **la futaie régulière** est une méthode qui consiste à régénérer la parcelle rapidement et dans son ensemble ; l'exemple le mieux connu est la plantation après coupe rase d'un peuplement mûr (figure 1.a) ; à cette catégorie appartiennent également les peuplements issus de semis obtenus par régénération naturelle (figure 1.b) ; dans ce cas, on ne fait pas une coupe rase du peuplement adulte préexistant, mais une série de coupes dosées pour permettre l'installation des semis, puis leur bon développement, jusqu'à ce que la jeune génération couvre suffisamment bien la surface. La futaie régulière obtenue par cette méthode n'est jamais complètement pure (d'autres espèces sont associées à l'essence principale, dans une proportion de 10 à 40%) et les différences d'âge entre arbres peuvent atteindre 30 ans ;
- **la futaie irrégulière** regroupe un ensemble de méthodes dont le point commun est que des arbres de tous âges et en général de plusieurs espèces coexistent en permanence dans la parcelle ; dans ce cas, la régénération est naturelle (par semis), continue au cours du temps et irrégulière sur la surface de la parcelle. Un premier type, très représenté en France, est le taillis-sous-futaie (figure 1.c) qui comprend deux étages de végétation superposés : les "réserves" sont de grands arbres, de plus de 10 m, dont les âges varient de 30 à

Figure 1.a• Futaie régulière d'épicéa issue de plantation

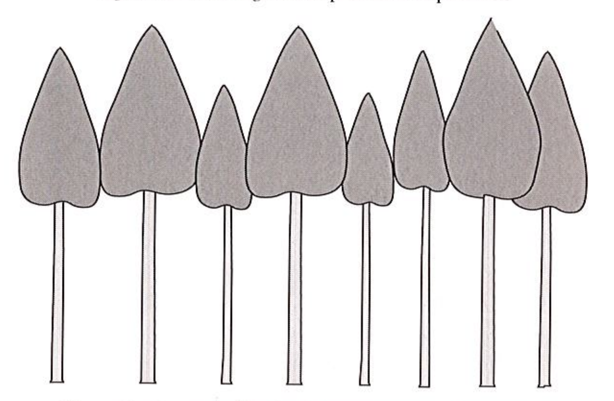


Figure 1.b• Futaie régulière de Hêtre avec 10% de Chêne sessile

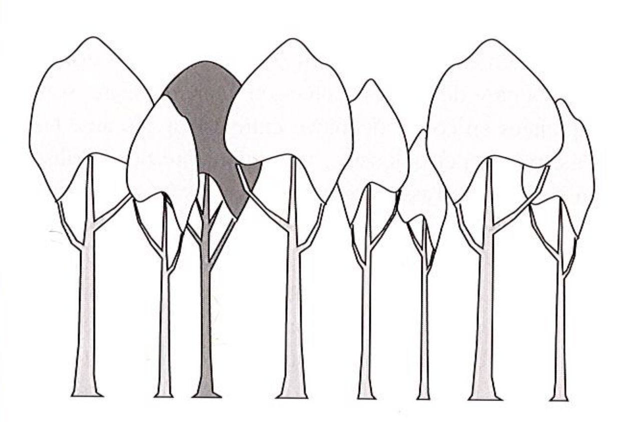


Figure 1.c• Taillis-sous-futaie avec réserves de chêne sessile et taillis de charme coupé tous les 25 ans

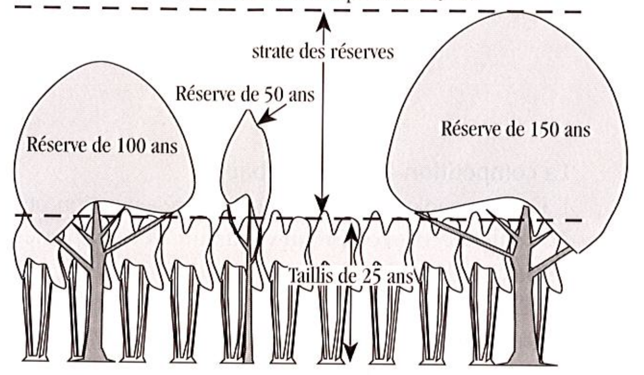
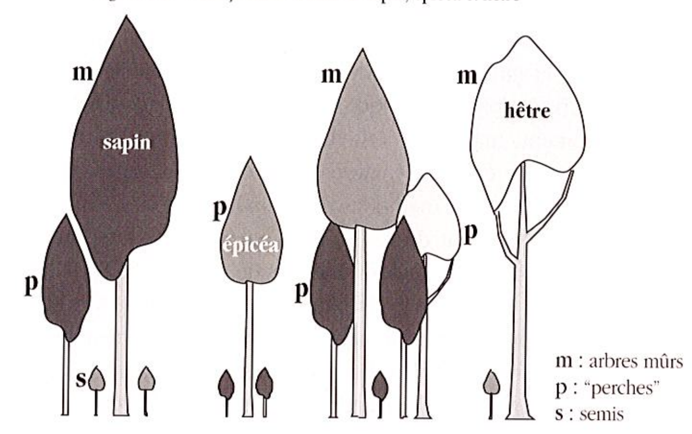


Figure 1.d• futaie jardinée à base de sapin, épicéa et hêtre



200 ans ; ces réserves sont coupées lorsqu'elles arrivent à maturité et sont remplacées par de jeunes arbres déjà installés ; en-dessous des réserves, il existe en général un sous-étage constitué de taillis de châtaigniers, charmes, chênes, tilleuls, selon la région et la richesse du sol ; ce taillis est coupé en totalité tous les 12 à 30 ans et se régénère par rejets sur les souches (reproduction végétative) ; un autre exemple est constitué par les futaies jardinées ou les futaies gérées par pied d'arbre (figure 1.d), où il n'y a pas de taillis mais une série ininterrompue d'arbres de toutes tailles, depuis le jeune semis jusqu'à l'arbre mûr.

Dans la tradition forestière européenne, le maintien de l'état boisé est fondamental ; c'est pourquoi les gestionnaires forestiers consacrent beaucoup de temps et d'énergie à réussir la régénération de leurs peuplements. La méthode adoptée dépend des objectifs qui sont assignés à la forêt (production de bois d'œuvre, accueil du gibier, protection des sols, paysage et accueil du public, conservation génétique) et des contraintes spécifiques qui pèsent sur le propriétaire (la surface de sa forêt, ses moyens financiers et ses connaissances forestières).

Diverses pratiques culturales

Une fois choisie une méthode de régénération, le forestier met en œuvre diverses pratiques culturales pour façonner le peuplement.

La coupe

La plus importante de ces opérations est la coupe progressive : dans le cas d'une futaie régulière de hêtre (*Fagus silvatica*) cultivée pour produire du bois de qualité (sciage, déroulage, tranchage), il s'agit d'amener une jeune génération de hêtres comptant 100.000 à 500.000 semis par ha jusqu'à un état final comprenant environ 100 arbres adultes par ha, de gros diamètre (50 cm et plus). Cela s'obtient par une série de 10 à 15 coupes d'éclaircie qui visent à remodeler progressivement le peuplement : on sélectionne de beaux arbres et on les desserre petit à petit en prélevant leurs concurrents les plus dangereux, on élimine les sujets malades, on conserve des arbres en sous-étage destinés à protéger les fûts des grands arbres contre les coups de soleil ou l'apparition de "branches gourmandes". L'éclaircie consiste donc à contrôler la structure verticale du peuplement (répartition des arbres dans les différentes strates) et à doser le mélange des espèces et la compétition entre arbres.

L'élagage artificiel

D'autres pratiques peuvent être adoptées, surtout au moment de la régénération et dans les stades les plus jeunes. L'élagage artificiel consiste à tailler des branches mortes ou vivantes ou à défourcher des arbres. Cette opération coûteuse est pratiquée lorsque la forme générale des arbres est mauvaise et elle est réservée aux sujets les plus prometteurs en termes de survie, vigueur, qualité...

La compétition avec les herbacées

Dans les peuplements très ouverts, la régénération peut être ralentie ou compromise par un développement exubérant de la flore herbacée. On applique donc parfois, lorsque le problème est aigu, des herbicides sélectifs qui visent à accélérer l'installation de dicotylédones (ronce, petits ligneux...), qui sont moins nocifs que les graminées dans la compétition pour l'eau avec les semis de l'essence souhaitée. Il convient d'ajouter que ces applications d'herbicides ne visent qu'à accélérer une substitution de flore qui se ferait de toute façon naturellement, mais plus lentement, qu'elles sont très réglementées en forêt (nature des produits, dosages, dates d'épandage et méthodes de préparation sont définis) et qu'en tout état de cause, seuls un ou deux traitements sont pratiqués pendant une longue période de 80 à 200 ans (la révolution de la parcelle). L'INRA et le CEMAGREF contribuent très fortement à la connaissance scientifique des interactions herbacées-ligneux et à la formation technique et réglementaire des forestiers sur cette question des herbicides.

Sylviculture et paysages forestiers

Finalement, on peut retenir que la sylviculture vise d'abord au maintien de l'état boisé et soigne donc tout particulièrement la régénération des peuplements. Deuxièmement, elle vise à façonner ces peuplements par la méthode des coupes d'éclaircie. Cette méthode impose de visiter fréquemment les parcelles et garantit donc une bonne connaissance de l'état de chaque forêt (inventaires, suivi de la régénération, suivi des chablis, c'est-à-dire des arbres déracinés ou écimés par les coups de vent). De plus, la méthode des éclaircies repose surtout sur l'analyse du peuplement (diagnostics sur la qualité et la vigueur des arbres) et sur un dosage continu de la concurrence. À ce titre, la sylviculture réclame très peu d'intrants de nature chimique et l'essentiel des éléments minéraux nécessaires à la croissance sont recyclés. On peut donc dire que la sylviculture est une activité peu intensive, en comparaison de l'agriculture.

Des paysages artificiels façonnés depuis des siècles

Pourtant, les paysages forestiers que nous avons sous les yeux sont profondément artificiels. Par exemple, dans les forêts feuillues du Nord de la France, que d'aucuns pourraient considérer comme assez "naturelles", un œil exercé reconnaît facilement les traces de la sylviculture passée pratiquée depuis le Moyen-Age ! Ainsi les taillis-sous-futaie sont l'héritage d'une exploitation forcenée des forêts, de l'Ancien Régime à la fin du siècle dernier, pour la production de bois de feu, du charbon de bois (usages industriels) et des glands (alimentation du bétail). C'est pour la même raison que les chênes (*Quercus petraea* et *Q. robur*) occupent aujourd'hui une place très importante dans cette zone où le hêtre est écologiquement plus performant.

Ce paradoxe apparent (une gestion forestière peu intensive, mais des forêts artificielles) provient d'abord de la très longue durée de la dynamique forestière. La durée de vie d'un chêne dépasse les 300 ans, les forêts domaniales à base de chênes, traitées en futaie régulière, sont exploitées en coupe définitive entre 180 à 250 ans. De plus, même peu intensive, la gestion forestière réalise un contrôle de l'association des essences (essence principale et essences subordonnées). Pour reprendre le cas des chênes et du hêtre, la valeur marchande plus grande du bois de chêne a conduit les forestiers à le privilégier aux dépens du hêtre, alors que la dynamique plus rapide de ce dernier lui assurerait certainement une place plus importante. Où l'on voit qu'un objectif de production peut se concilier avec le maintien d'une certaine diversité génétique.

Prévoir l'évolution des peuplements : modéliser la dynamique des peuplements

À cause de la très longue durée caractéristique des forêts, le forestier doit connaître les grands traits de la dynamique des peuplements, savoir comment cette dynamique est influencée par ses choix sylvicoles et il doit enfin être capable d'anticiper, de prévoir l'évolution des peuplements pour éclairer ses décisions actuelles. Aujourd'hui, ces problèmes sont traités par des méthodes de simulation reposant sur des modèles de croissance.

Nos connaissances sur la dynamique des peuplements forestiers concernent essentiellement les peuplements purs traités en futaie régulière, pour lesquels les premières placettes permanentes d'observation ont été installées entre 1880 et 1930. Nous disposons donc de séries de données détaillées, longues de 60 à 110 ans. Des dispositifs statistiques ont été installés depuis 1950, afin de comparer diverses méthodes d'éclaircie sur des bases scientifiques plus sûres.

Aspects démographiques : naissance et mort des arbres

- Mort des arbres

C'est sur la mort des arbres que nous avons les connaissances quantitatives les plus fiables. Celle-ci fait partie de l'évolution spontanée des forêts : ainsi, le renouvellement de la forêt naturelle (par exemple, la forêt humi-

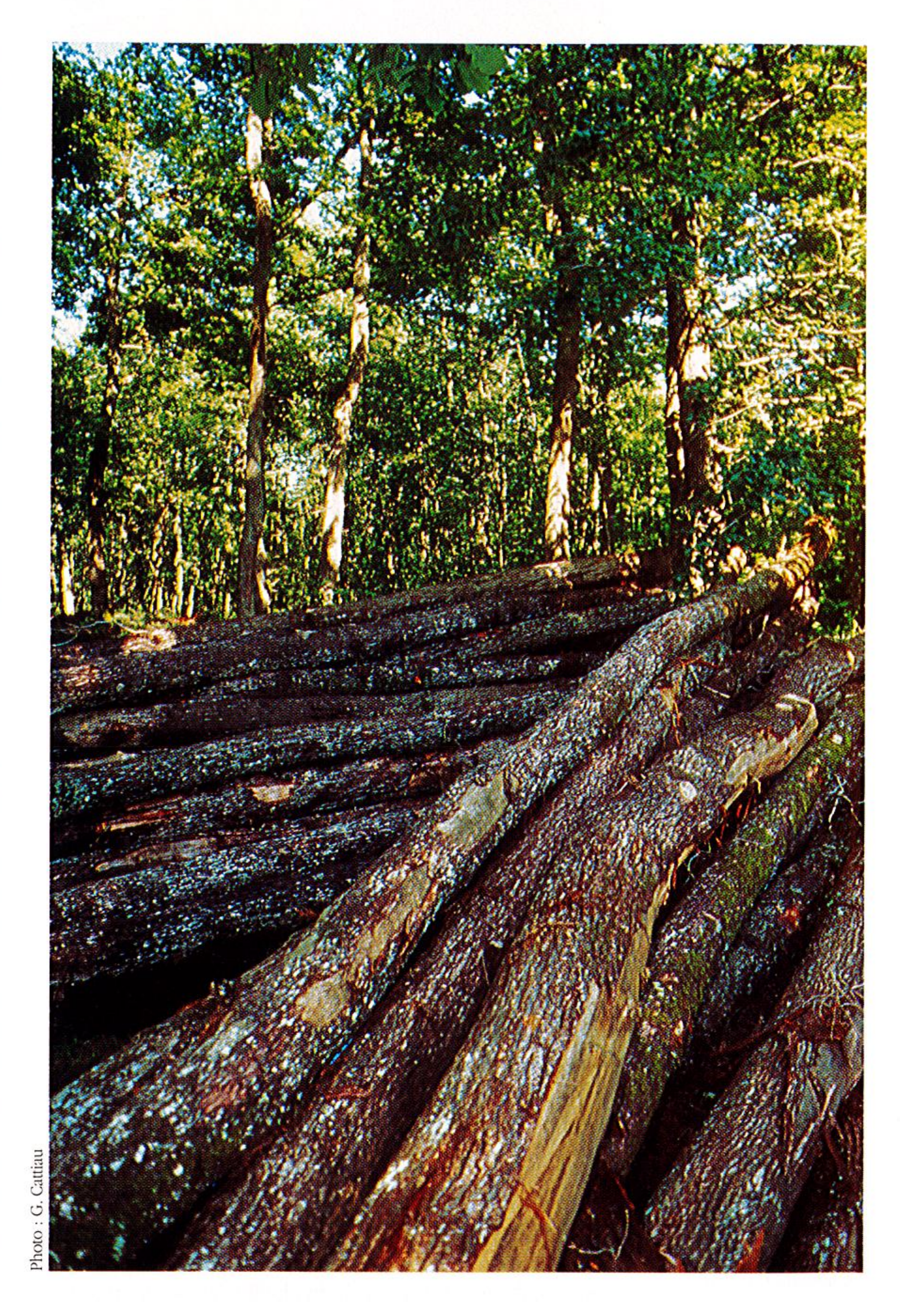
de équatoriale) repose sur la disparition d'arbres surannés (maladies, chablis) et leur remplacement par une succession d'espèces adaptées au microclimat de la trouée ainsi créée. Ces situations sont simulées par la famille des "gap models" (Shugart, 1984).

Dans les futaies régulières tempérées, la mortalité dite "naturelle" prend également des proportions impressionnantes. Par exemple, une hêtraie non éclaircie en Forêt de Haye (Meurthe-et-Moselle), observée de 1883 à aujourd'hui, a vu sa densité diminuer de 15000 à 250 arbres par ha entre 28 et 135 ans, sans que ni le forestier ni les guerres y soient pour quelque chose ! Cette mortalité est maintenant bien décrite par la "loi d'autoéclaircie", qui relie le nombre d'arbres survivants à leur dimension moyenne. Elle est observée dans des peuplements extrêmement denses, au couvert fermé, et concerne essentiellement des arbres très grêles, qui ne peuvent pas "suivre la course" imposée par leurs voisins plus vigoureux (voir plus loin les considérations de statut social).

Outre l'excès de compétition, la deuxième source de mortalité est constituée par les "chablis et volis" (arbres déracinés ou cassés par les vents violents). Pour la plupart des essences, mais surtout pour les résineux, il s'agit d'un risque majeur comme l'attestent les dégâts considérables causés par les tempêtes de novembre 1982, janvier-février 1990 et les tornades de juillet 1984. La stabilité des peuplements d'épicéa a été bien étudiée et l'on sait maintenant définir numériquement quels types de peuplements sont les plus sensibles : dans les peuplements très serrés (plantations jamais éclaircies), les arbres sont grêles, mal enracinés et donc très exposés ; une éclaircie trop forte dans un peuplement trop haut est également risquée. La culture des résineux s'oriente donc vers la formation d'arbres vigoureux, bien enracinés au moyen de faibles densités de plantations et d'éclaircies précoces. Dans les régions avec vent dominant fort (Ecosse, par exemple), toute la sylviculture est contrainte par le risque de chablis (récolte à 20 m de haut, parfois).

• Naissance des arbres

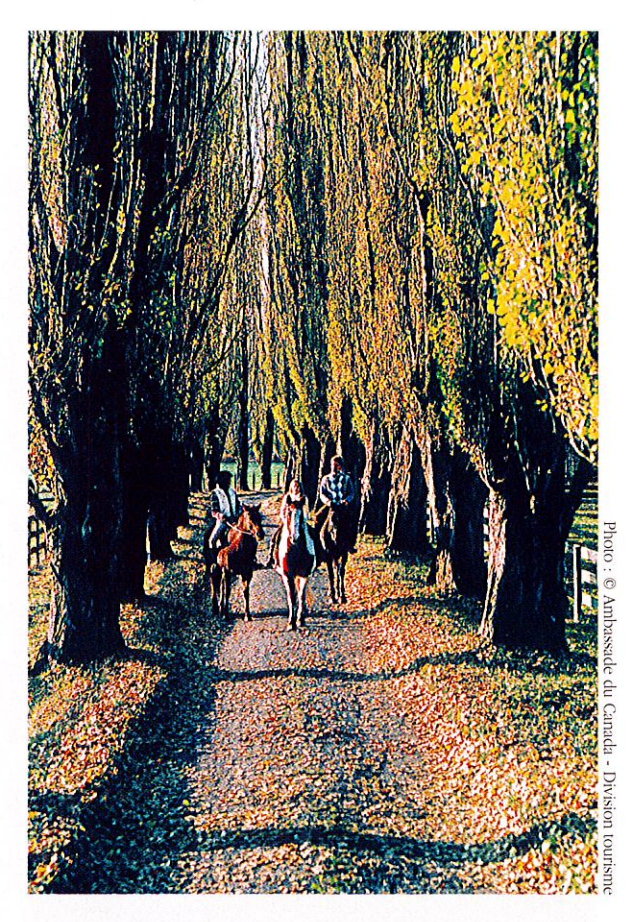
La naissance des arbres et les difficultés de régénération ont été étudiées dans certains cas, en mettant l'accent sur la fructification, la prédation par les animaux ou les pathologies, l'installation des semis, l'effet des conditions écologiques (Oswald et coll., 1981). Bien que ces résultats soient précieux pour les sylviculteurs, force est de reconnaître que, par rapport à la mortalité, la naissance des arbres est plus difficile à prédire de façon quantitative.


Photo : G. Cattiau

Production de biomasse

• Hauteur et production de biomasse étroitement liées

Le couvert forestier produit des assimilats, qui sont redistribués dans les différents organes (feuilles, racines, tronc et branches) ou recyclés dans l'écosystème. Les modèles de croissance décrivent la part de la biomasse fixée la plus facile à mesurer et la plus importante dans une optique de production, c'est-à-dire l'accroissement en volume de tout le peuplement. L'accroissement en volume dépend d'abord de la fertilité de la station : plus elle est riche, plus l'accroissement en hauteur et la production de la partie aérienne sont forts. L'étroite liaison entre croissance en hauteur et production en volu-


Photo : © Ambassade du Canada - Division tourisme

me a très tôt été mise en évidence : on l'appelle "loi de Eichhorn" (1904). C'est une hypothèse fondamentale en foresterie.

• **Densité du couvert végétal, des arbres, du peuplement**
Le second facteur qui détermine la production en volume est le degré de fermeture du couvert. Lorsque le couvert est très clairsemé, à la suite d'une éclaircie très forte, l'accroissement global baisse. Toutefois, si les éclaircies restent modérées, cette baisse est faible voire insensible selon les espèces. Pour le forestier, cela signifie qu'après une éclaircie il peut espérer une même production globale, répartie sur moins d'arbres, et donc une meilleure croissance individuelle. Vu sous un autre angle, cela signifie que la pratique des éclaircies ne compromet pas la capacité productive du peuplement. De façon générale, les modèles de croissance permettent d'estimer l'accroissement en fonction de la densité du peuplement.

Le peuplement forestier : une société très hiérarchisée en compétition pour la lumière

Sans tomber dans l'anthropomorphisme, les forestiers ont depuis longtemps constaté que les arbres s'ordonnent spontanément selon une hiérarchie sociale très stricte. Ces positions ont été codifiées par les termes de "dominant, co-dominant, dominé, surcimé", auxquels s'ajoutent les "émergents", surtout en forêt naturelle équatoriale.

En l'absence de toute intervention du forestier, la hiérarchie des arbres par classes de taille (hauteur, diamètre) s'installe très tôt, dès que le couvert se ferme, et reste ensuite relativement stable. Les arbres qui sont initialement les plus gros localement le doivent soit à une vigueur plus grande d'origine génétique, soit à des facteurs accidentels, soit enfin aux hétérogénéités du sol. Ultérieurement, les changements de rang social sont pour l'essentiel des régressions : un arbre entouré de voisins plus vigoureux s'épuise d'abord à les suivre dans la course en hauteur, pour garder un accès à la lumière, puis finit par lâcher prise et se trouve relégué dans le sous-étage. Ces arbres se retrouvent à l'ombre avec un feuillage très réduit et ont donc une capacité de photosynthèse limitée, alors qu'ils doivent entretenir une grande longueur de tronc. Ce déséquilibre physiologique se termine fréquemment par la mort, alors que des arbres moins hauts peuvent survivre et attendre dans la lumière diffuse du sous-étage. On le voit, la compréhension des hiérarchies sociales repose surtout sur le phénomène de compétition pour la lumière.

Les différentes essences forestières ont bien sûr des sensibilités variées vis-à-vis de la compétition pour la lumière : les forestiers parlent ainsi d'essences de lumière, intolérantes à l'ombrage, comme le chêne pédonculé (*Quercus robur*) et d'essences d'ombre, plus tolérantes (hêtre, sapin).

Des modèles de croissance pour simuler l'évolution d'arbres et de peuplements

L'ensemble des résultats exposés plus haut sont maintenant combinés sous la forme de simulateurs. Il s'agit de logiciels interactifs permettant à un forestier aguerri de tester différentes méthodes sylvicoles et d'analyser leur effet sur l'état du peuplement. Certaines des applications de ces simulateurs concernent le long terme, c'est-à-dire la durée d'une révolution (80 à 250 ans selon les espèces).

De tels modèles existent actuellement en France pour des peuplements purs et réguliers de pin maritime, épicéa, douglas, pin noir d'Autriche, hêtre et chêne (Barthélémy et al. 1995).

Jean-François Dhôte,
Dynamique des Systèmes forestiers, ENGREF-INRA,
14 rue Girardet 54042 Nancy cedex ■

Pour en savoir plus

• Oswald H., Le Tacon F., Becker M., Perrin R., Picard J.F., Le Louarn H., Malphettes C.B. 1981. Contributions à "Régénération naturelle". In "Le Hêtre", INRA Editions, Paris.
• Delvaux, J., 1981. Différenciation sociale. J. For. Suisse, 132, 9, p. 733-749.
• Barthélémy D., Blaise F., Fourcaud T., Nicolini E., Ottorini J.M., Dhôte J.F., Dreyfus Ph., Bonnet F.R., Lemoine B., Guo B., Peyron J.L., Leban J.M. 1995. Contributions à "Modélisation de la croissance et de la qualité des bois", ed. F. Le Tacon. Rev. For. Fr., XLVII, n° spécial 1995.

2 La productivité des forêts en Europe s'accroît : une réalité aux conséquences considérables

Depuis quelques années, les changements globaux sont devenus un sujet de préoccupation grandissante en Europe aussi bien qu'en Amérique du Nord. Ainsi, bien que de sérieuses divergences divisent encore la communauté des climatologues, la majorité s'accorde à prédire un réchauffement notable de l'atmosphère terrestre à relativement court terme. Selon les modèles, ce réchauffement pourrait atteindre en moyenne 1,5 à 4 °C d'ici 2050, avec de fortes hétérogénéités régionales. Le phénomène serait dû à la forte augmentation de la concentration de gaz dits "à effet de serre" dans l'atmosphère. Parmi eux, le gaz carbonique (CO_2) est le plus important. C'est lui en effet qui a été le plus rejeté dans l'atmosphère depuis l'avènement de l'ère industrielle par la combustion accélérée de nos énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel). Face à cette dynamique quasi irréversible, une des questions qui se posent est la suivante : comment cette augmentation du taux de CO_2 atmosphérique va-t-elle se répercuter sur le fonctionnement des écosystèmes, en particulier sur celui des écosystèmes forestiers ?


Photo : P. Dubois

Voir aussi "Les forêts face à l'augmentation du gaz carbonique dans l'atmosphère" page 13.

Cette influence de l'augmentation du taux de CO_2 atmosphérique sera-t-elle principalement *directe*, par une amélioration de la photosynthèse - on sait en effet que le CO_2 est un facteur limitant de la croissance chez la plupart des végétaux -, ou également *indirecte*, via le changement concomitant des conditions climatiques (principalement la température et les précipitations) ?

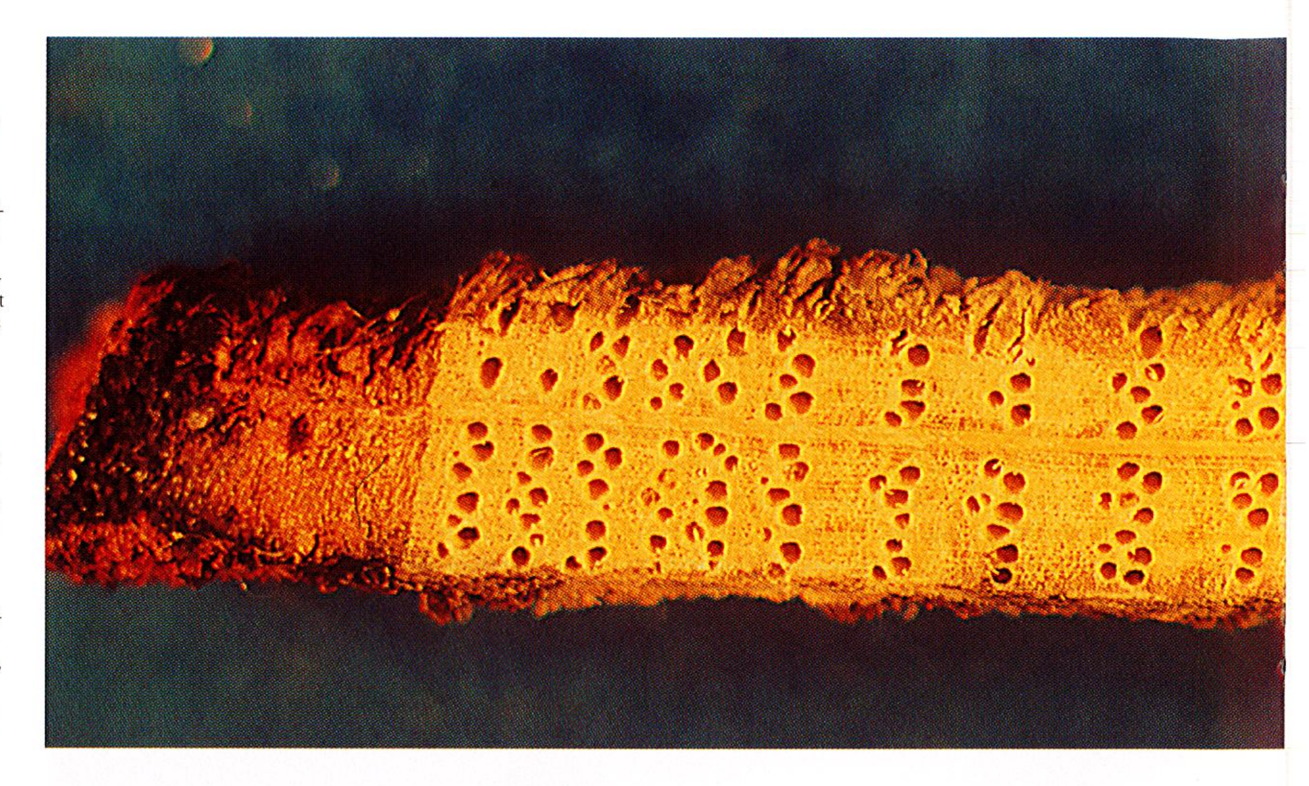
La forêt et les changements globaux

Il existe de nombreuses façons d'aborder ce difficile problème. L'une d'elle consiste à poser qu'en fait, de telles interrogations sur les conséquences possibles des changements globaux ne devraient pas être totalement nouvelles. On sait en effet que la concentration en CO_2 atmosphérique est déjà passée d'environ 280 ppm en 1850 à 370 ppm en 1996, et qu'elle augmente de plus en plus vite depuis quelques dizaines d'années. Par ailleurs, une tendance positive à long terme de l'évolution de la température moyenne de notre planète a déjà été mise en évidence : environ +0,7°C depuis 1880. Il était donc permis de se demander si ces changements ne se sont pas déjà traduits par des réactions sensibles des écosystèmes forestiers, et, si oui, il apparaissait important de faire une analyse rétrospective de ces réactions et de les quantifier.

[1] Divers incidents, d'origine climatique le plus souvent, peuvent en effet se répercuter sous forme de "faux-cernes ou au contraire de "cernes manquants". L'interdatation repose sur l'utilisation d'années caractéristiques progressivement mises en évidence, années au cours desquelles la croissance est nettement plus faible ou plus forte que l'année précédente chez la grande majorité des arbres. Puis on calcule la surface de chacun des cernes, à partir de leur largeur et de leur distance à la moelle. La surface des cernes présente en effet l'avantage d'être plus directement proportionnelle à la croissance en volume que leur largeur. Enfin, de façon à compenser la part de variation des données liée au vieillissement biologique normal des arbres, chaque surface annuelle est "standardisée", c'est-à-dire convertie en un indice indépendant de l'âge du cerne correspondant (appelé aussi "âge cambial"). Cette standardisation s'opère en deux étapes successives.

• On commence par calculer, pour chaque âge cambial, de 1 à 200 ans et plus, la moyenne de toutes les surfaces de cernes disponibles dans l'ensemble de l'échantillon. La courbe ainsi obtenue est d'emblée relativement "lisse". En effet, étant donné la grande variété d'âge actuelle des arbres échantillonnés, à chaque âge cambial correspondent des cernes élaborés à des dates très variées, donc dans des conditions écologiques, sylvicoles et météorologiques elles-mêmes très variées, dont les effets opposés sur la croissance se compensent mutuellement. Cette courbe est en fait le reflet de la loi biologique moyenne liant la croissance radiale au vieillissement des arbres dans la région considérée.

• Ensuite, après un ajustement mathématique de la courbe précédente, les indices de croissance radiale sont calculés ; chaque indice est le rapport, exprimé en %, de la surface de cerne mesurée à la surface estimée fournie par la courbe ajustée au même âge cambial. Tous ces indices peuvent alors être valablement comparés entre eux en faisant abstraction de l'âge des cernes correspondants, ce qui est fondamental pour le but recherché.



Un outil d'analyse, la dendrochronologie

La dendrochronologie, qui repose sur la reconstruction de la croissance passée des arbres, semblait une méthode à privilégier dans cette approche. Elle s'est en effet déjà avérée fort efficace dans l'analyse du fonctionnement, normal ou perturbé, des écosystèmes forestiers. C'est ainsi qu'elle a permis, dans le contexte du programme français DEFORPA, de mettre en évidence divers facteurs responsables du dépérissement observé il y a quelques années dans les forêts des montagnes du Nord-Est de la France (Vosges, Jura). Parmi ces facteurs figurait le climat, en particulier la succession d'années caractérisées par des épisodes de sécheresse marquée.

Ce même outil, la dendrochronologie, a donc été mis en oeuvre pour rechercher d'éventuelles modifications à long terme, à savoir à l'échelle du siècle, de la croissance radiale des arbres des forêts d'Europe tempérée. Sont résumés ici les principaux résultats de ces investigations.

Les méthodes utilisées et les forêts étudiées

Plusieurs espèces d'arbres, feuillues et résineuses, et diverses régions forestières, tant à l'étage "montagne" qu'à l'étage "colline", ont fait l'objet de telles études dendrochronologiques. Ces études ont toutes en commun un échantillonnage très abondant d'arbres, eux-mêmes issus de peuplements nombreux choisis de façon à couvrir au mieux la variabilité écologique des régions prospectées (altitude, exposition, topographie, sol, végétation). De plus, afin de pouvoir efficacement séparer, dans l'analyse de la croissance radiale, les effets du vieillissement naturel des arbres de ceux liés éventuellement à l'année calendaire, les peuplements ont été choisis d'âges très variés, entre 20 ans et 200 ans et plus.

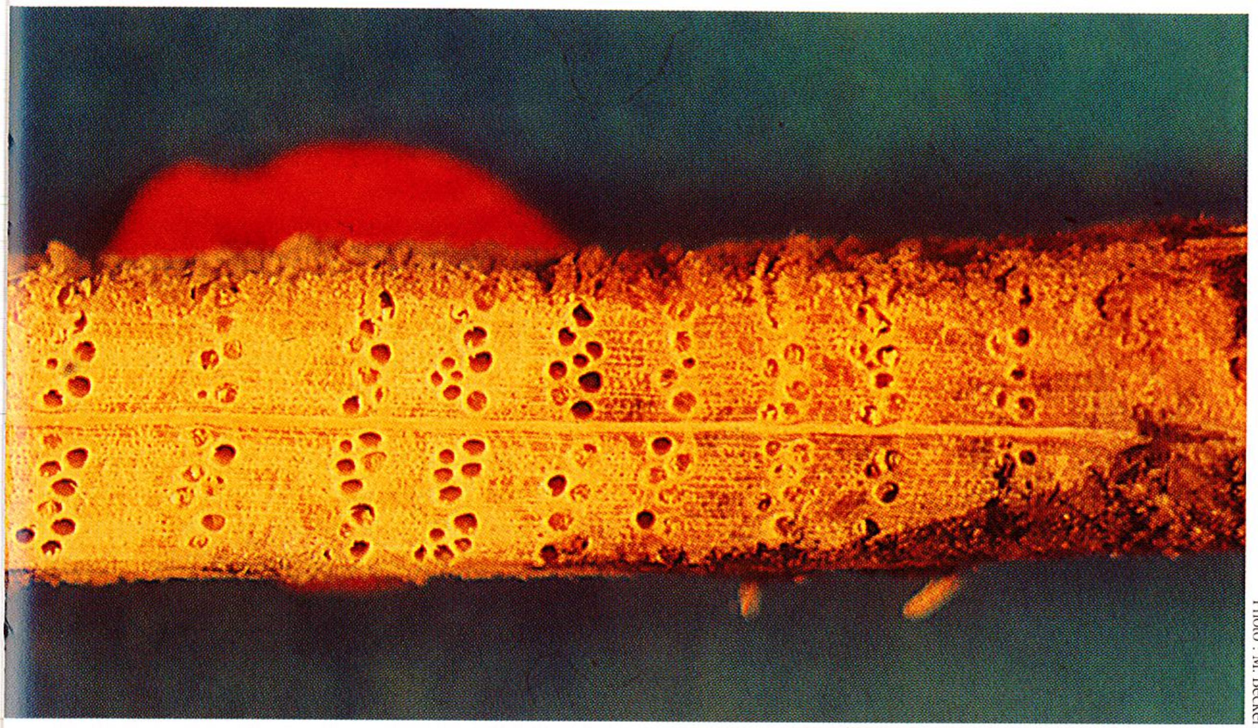
Sur chaque site, seuls les arbres dominants ou co-dominants, c'est-à-dire peu concurrencés par leurs voisins, ont fait l'objet d'un "carottage", à l'aide d'une sorte de tarière creuse, appelée tarière de Pressler. Celle-ci permet de prélever dans le tronc des arbres, généralement à 1,30 m du sol, un petit bâtonnet de bois de 4 ou 5 mm de diamètre, la "carotte", allant de l'écorce jusqu'au "coeur" de l'arbre (en fait la moelle). Un maximum de précautions sont prises pour limiter l'endommagement des arbres sondés. Selon les études, une ou deux carottes ont été prélevées dans chaque arbre.

Les principales études menées à bien à ce jour portent sur des forêts naturelles de production, c'est-à-dire où les essences sont spontanées et où la gestion forestière peut concilier un double objectif de production de bois et de préservation des écosystèmes. Pour des raisons statistiques, le nombre de sites et d'arbres observés est très élevé : par exemple le sapin dans les Vosges, 277 sites, 1662 carottes ou le hêtre, 158 sites et 948 carottes. Les espèces étudiées sont :

• le sapin dans les montagnes des Vosges et du Jura
• l'épicéa dans les Vosges
• le hêtre dans les Vosges, les plateaux calcaires de Lorraine et les plaines alluviales de Lorraine
• le chêne sur les sols argileux du Plateau Lorrain : chêne sessile et chêne pédonculé.

Par ailleurs, deux autres situations très contrastées par rapport aux précédentes ont été étudiées :

• le pin laricio de Corse dans la région des Pays de la Loire, où cette espèce est maintenant très utilisée dans les reboisements ; l'objectif de la sylviculture est ici avant tout la production de bois



Fragment d'une carotte de chêne pédonculé. Les alignements de petites perforations qui apparaissent en noir correspondent aux gros vaisseaux fabriqués chaque année par l'arbre en début de saison de végétation (bois initial). Ils permettent de dater précisément chaque cerne.

Photo : M. Becker

• le pin à crochets dans les Hautes-Pyrénées, à la limite altitudinale supérieure de la végétation forestière ; ici, il ne s'agit pas d'une "forêt" au sens habituel du terme, mais d'une formation végétale très ouverte ne faisant l'objet d'aucune sylviculture ; les arbres y sont épars et leur croissance n'est donc pas contrariée par la concurrence de leurs voisins.

Les séries chronologiques de largeurs et de surfaces de cernes correspondant à chaque carotte sont alors minutieusement "interdatées", opération qui consiste à s'assurer de la parfaite datation de chaque cerne annuel [1].

Les résultats obtenus à ce jour

Une forte augmentation du potentiel de croissance radiale au cours du siècle écoulé

Pour chaque essence forestière et chaque région, il est possible de calculer l'évolution des indices de croissance moyens au cours du temps, depuis 1850 environ dans la plupart des études, depuis 1930 dans le cas des plantations de pin laricio des Pays de la Loire (il n'existe que très peu de plantations plus anciennes), et depuis 1750 pour les pineraies de pin à crochets des Hautes-Pyrénées (dans lesquelles il a été possible de trouver des arbres multi-centenaires).

Toutes les courbes obtenues montrent d'importantes variations interannuelles et de nettes périodes de dépression de la croissance à l'échelle de la décennie, qui s'expliquent pour une très large part par les fluctuations climatiques concomitantes. Mais toutes mettent aussi en évidence une forte augmentation de croissance radiale sur le long terme :

• sapin dans les Vosges : + 160% depuis 1850 ; un plateau s'observe de 1930 à 1982, suivi d'une augmentation considérable depuis 1983 ;
• sapin dans le Jura : augmentation comparable, + 130% depuis 1865, avec le même plateau à partir de 1930 ;
• épicéa dans les Vosges : augmentation soutenue de + 130% depuis 1865 ;
• hêtre dans les Vosges : + 90% depuis 1850, avec une nette accélération du phénomène depuis 1950 ;
• hêtre sur les plateaux calcaires de Lorraine : + 60 à + 120% depuis 1880 selon le type de sylviculture appliqué aux peuplements ;
• hêtre dans les plaines alluviales de Lorraine : + 125% depuis 1860 ;
• chêne sessile sur les sols argileux du Plateau Lorrain : + 90% de 1850 à 1987, avec une accélération continue depuis 1850 ;
• chêne pédonculé dans le même contexte : + 55% "seulement" de 1850 à 1987 ;
• pin laricio de Corse dans les Pays de la Loire : + 50% depuis 1930 ;
• pin à crochets dans les Hautes-Pyrénées : stabilité de 1750 à 1850, + 100% depuis.

Un modèle mathématique utilisant les données météorologiques du poste de Strasbourg (précipitations mensuelles et températures moyennes mensuelles, disponibles depuis 1881) a été établi pour le sapin des Vosges. Ce modèle "explique" 79% de la variation observée et reconstruit de façon très satisfaisante aussi bien la tendance à long terme que les fluctuations de plus haute fréquence de la croissance. Sur la base de ce seul premier exemple, on aurait pu être tenté de penser que le rôle de l'augmentation du CO_2 atmosphérique sur la croissance des arbres est davantage indirect (via le climat) que direct (stimulation de la photosynthèse).

Mais la mise en oeuvre de la même méthode pour le sapin dans le Jura nous a conduit à une conclusion quelque peu différente. Dans ce cas, il n'a pas été possible de modéliser de façon très satisfaisante la tendance à long terme observée à partir des seules données climatologiques (celles de Besançon, Neuchâtel et Genève). Par contre, l'introduction complémentaire des données connues de CO_2 atmosphérique dans le modèle a permis de porter le taux d'explication à 89%. Un résultat comparable a également été obtenu pour les chênes pédonculé et sessile du Plateau Lorrain (respectivement 78 et 73%).

Comment interpréter ces résultats ?

Hors de France, des études dendrochronologiques toutes récentes suggèrent également que la productivité de divers écosystèmes forestiers a augmenté de façon significative au cours du siècle écoulé. Cette augmentation est observée dans les forêts boréales d'Europe et d'Amérique du Nord, ainsi que dans les forêts de montagne de la zone tempérée. Par ailleurs, avec une approche méthodologique différente, des chercheurs allemands ont obtenu un résultat comparable en Forêt-Noire, par la comparaison directe de la production ligneuse totale de deux générations successives d'épicéas sur les mêmes dispositifs expérimentaux.

Une certaine incertitude demeure cependant dans l'interprétation des résultats présentés ici. On peut en effet légitimement s'étonner de l'ampleur des augmentations observées. Deux types de questions peuvent être débattues dans la recherche d'un biais éventuel. Tous deux se rapportent à la pertinence des échantillons d'arbres étudiés face à l'objectif visé.

• La première question a trait à la structure spatiale de l'échantillon et à la diversité écologique des stations correspondantes. On peut en effet suspecter que les arbres très vieux se rencontrent préférentiellement dans les stations défavorables : à moins d'être compensée par une compétition plus faible, la croissance radiale y est plus lente et l'âge d'exploitabilité est atteint plus tardivement. Dans le cas du Jura, par exemple, un premier traitement indifférencié des données suggérait une augmentation peu réaliste du niveau de croissance (+400%). Ceci tenait au fait que les arbres les plus vieux disponibles dans l'échantillon global étaient le plus souvent situés en altitude, dans des stations difficiles, et soumis à une sylviculture particulière ("futaie jardinée"). C'est pourquoi le résultat présenté plus haut se rapporte en fait à un sous-échantillon d'arbres sélectionnés selon des critères sévères : futaie régulière typique, âge inférieur à 150 ans, altitude comprise entre 900 et 1100 m. Dans les autres exemples présentés, les divers essais de stratification réalisés pour déceler d'éventuels biais ne se sont pas traduits par des changements sensibles dans les courbes moyennes obtenues.

• La seconde question concerne la structure interne des peuplements échantillonnés et la représentativité des arbres choisis. On peut en effet se demander si les vieux arbres disponibles et choisis aujourd'hui auraient été choisis avec la même probabilité si l'étude avait eu lieu 40 ou 80 ans auparavant. Il est bien difficile de l'affirmer catégoriquement. On sait cependant qu'à moins de perturbations locales majeures (problème phytosanitaire, tempête...) ou une intervention délibérée mais tout à fait inhabituelle du forestier, la hiérarchie sociale des arbres n'est guère bouleversée tout au long de leur vie, tout au moins dans les peuplements plus ou moins équiennes. Le cas des pineraies à pins à crochets de haute altitude, là où il n'y a ni compétition ni sylviculture, permet d'ailleurs de s'affranchir de cette hypothèque, et l'on constate là aussi une forte augmentation du niveau de croissance.

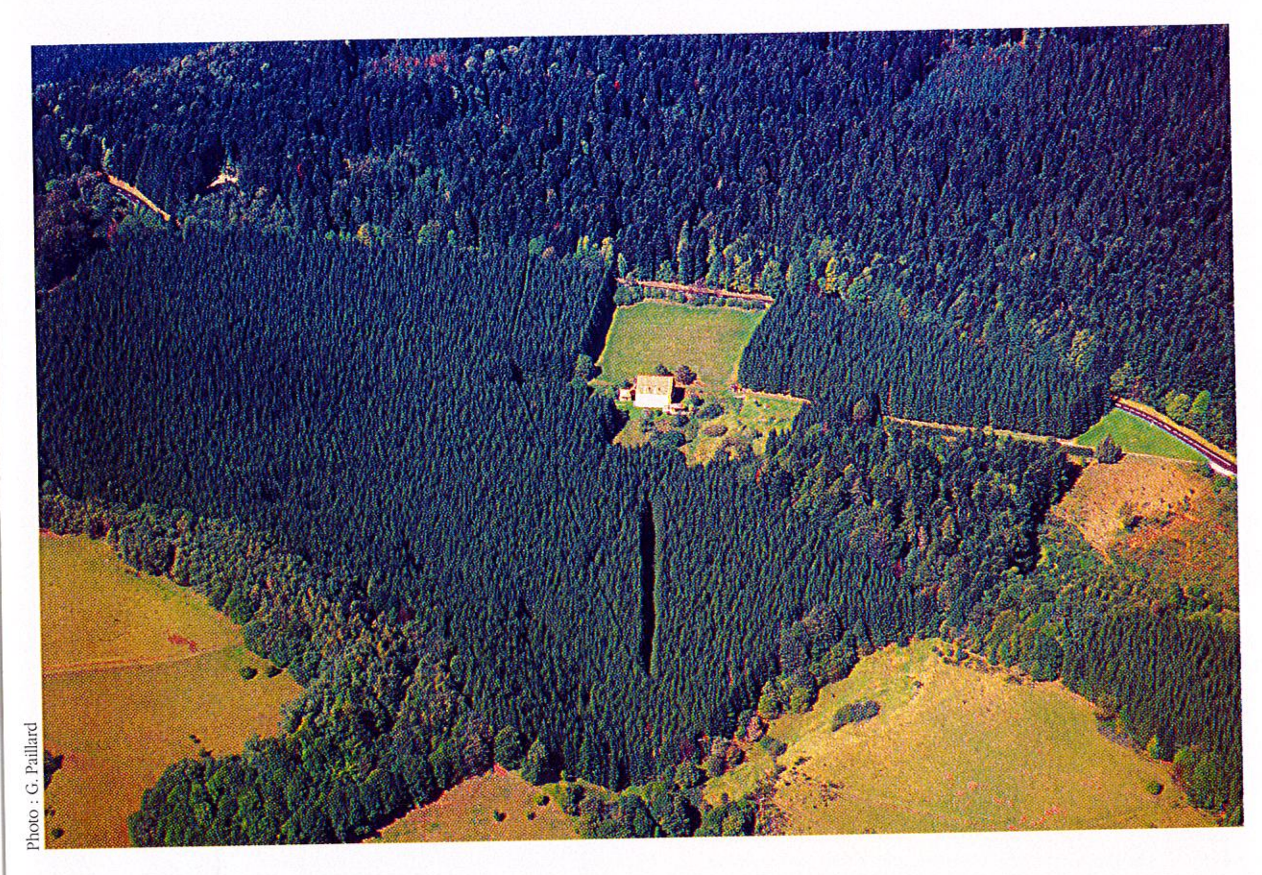
Tout récemment, un nouvel argument de poids est venu étayer la thèse d'une **augmentation généralisée de la productivité des écosystèmes forestiers**. Dans le cadre d'une collaboration avec des chercheurs québécois, une série d'analyses de troncs a permis de reconstruire la dynamique de la croissance en hauteur de l'épinette noire dans la forêt boréale du Nord-Québec, dans des peuplements où l'action de l'homme a été nulle et où le niveau de pollution de l'air (hormis le CO_2) est extrêmement bas. Il apparaît que la croissance en hauteur, que l'on sait être un critère beaucoup plus sûr de la productivité que la croissance en diamètre, est effectivement beaucoup plus rapide actuellement qu'il y a un siècle.

Par ailleurs, d'autres études ont été engagées depuis peu par d'autres pays européens sur le thème d'un possible changement de productivité des forêts. La grande majorité des premiers résultats disponibles à ce jour concluent également à une nette augmentation.

Si la réalité du phénomène semble désormais bien établie, les mécanismes physiologiques sous-jacents ne sont pas évidents. Les études expérimentales menées jusqu'à présent pour éprouver l'effet d'atmosphères enrichies en CO_2 ont livré des résultats variés, parfois contradictoires. La plupart révèlent cependant des effets positifs plus ou moins importants. Il faut aussi considé-

Pour en savoir plus

• M. Becker, 1987. La santé de la forêt : le sapin témoigne. La Recherche, 191, 1096-1098.
• M. Becker et J. Levy, 1988. À propos du dépérissement des forêts : climat, sylviculture et vitalité de la sapinière vosgienne. Revue forestière française, 40, 5, 345-358.
• M. Becker, 1991. Incidence des conditions climatiques édaphiques et sylvicoles sur la croissance et la santé des forêts. In : Les recherches en France sur le dépérissement des forêts, Programme DEFORPA, 2e rapport, ENGREF, Nancy, 25-41.
• M. Becker, G.D. Bert, J. Bouchon, J.F. Picard, E. Ulrich, 1994. Tendances à long terme observées dans la croissance de divers feuillus et résineux du Nord-Est de la France depuis le milieu du 19ème siècle. Revue forestière française, 46, 4, 335-341.


Photo : G. Paillard

rer que l'importance accordée au CO_2 atmosphérique dans les modèles présentés plus haut est pour le moment purement statistique. D'autres facteurs, certains corrélés au CO_2, pourraient aussi avoir joué un certain rôle, tels que d'autres gaz à effet de serre et/ou les dépôts atmosphériques azotés liés aux activités agricoles et à la circulation automobile. Il apparaît donc nécessaire de multiplier les études s'attachant à quantifier l'impact des changements environnementaux sur la physiologie des arbres, non seulement au stade semis et jeunes plants mais aussi chez les arbres adultes et à l'échelle des peuplements qu'ils constituent. De telles recherches apparaissent une priorité majeure dans la perspective des changements globaux à venir.

Quoi qu'il en soit, en dépit des incertitudes qui demeurent quant aux causes précises du phénomène, il apparaît désormais acquis que les écosystèmes forestiers, du moins ceux de la zone tempérée, ont d'ores et déjà fortement répondu aux changements des conditions environnementales liés aux activités humaines depuis le milieu du 19ème siècle. Cette donnée nouvelle, pratiquement encore insoupçonnée il y a quelques années à peine, va devoir être prise sérieusement en compte dans la gestion forestière, dont certaines règles reposaient jusqu'ici plus ou moins explicitement sur la constance dans le temps du potentiel de croissance. Le rythme et l'intensité des "éclaircies" périodiques dans les peuplements devront être aménagés. Les récoltes de bois vont pouvoir, et même devoir être plus importantes, et toutes les industries de la filière-bois en seront affectées, avec des aspects positifs et négatifs qu'il importe de prévoir au mieux.

Enfin, la question de la stabilité, voire de la pérennité de certains écosystèmes, forestiers en particulier, méritera vraisemblablement d'être étudiée avec attention, surtout si l'effet de changements climatiques (température, précipitations) se surimpose à celui de l'élévation du taux de CO_2 atmosphérique. Certaines espèces d'arbres risquent plus ou moins rapidement de mal tolérer les nouvelles conditions qui leur sont imposées. De plus, étant donné la longueur des générations de ces espèces, leur pouvoir de migration naturelle vers des situations convenant mieux à leur écologie risque fort d'être insuffisant. Là encore, une lourde responsabilité va incomber aux forestiers pour apprécier cet aspect et anticiper artificiellement, et suffisamment tôt, sur ces mouvements d'espèces, sous peine d'être confrontés à des dépérissements de plus en plus nombreux, graves et fréquents.

Michel Becker,
INRA, Écophysiologie forestière,
Équipe Phytoécologie forestière,
Centre de Recherches de Nancy
54280 Champenoux ■



Très riches heures du duc de Berry. Novembre : la glandée. Miniature de Pol de Limbourg et Jean Colombe, France, 15ème siècle. Musée de Condé, Chantilly.



Les hommes et leurs forêts

La Conférence des Nations Unies pour l'Environnement et le Développement (Rio 1992) a justement insisté sur la place centrale de l'homme, acteur de la gestion. Nous avons choisi dans ces dossiers d'illustrer les relations de l'homme et la forêt en mettant l'accent sur quatre thèmes :

• en matière forestière, compte tenu du long cycle de vie des arbres, le "bon gérant" doit se fixer des objectifs à long terme et planifier l'ensemble des travaux et opérations permettant de les atteindre, c'est l'objet de **l'aménagement forestier**, dont les concepts, les méthodes et les questionnements à la recherche sont exposés ici. Discipline de synthèse par excellence, l'aménagement réussi constitue réellement le fondement de la gestion forestière durable ;

• il est particulièrement justifié de s'interroger sur **l'emploi** ou les emplois de toute nature qui découlent de la forêt et des industries forestières (notamment en zone rurale) ; ils pèsent lourd dans l'économie française ;

• mais les hommes bénéficient aussi des **biens et services non marchands fournis par la forêt** ; ils sont de natures très diverses : valeur esthétique, valeur écologique (conservation des sols et des eaux, mobilisation du carbone), valeur patrimoniale (biodiversité)... Ils nécessitent de sérieux efforts pour mieux les qualifier et les quantifier, et donc mieux les prendre en compte ;

• enfin, une mention spéciale est faite de **l'agroforesterie** dans ses différents scénarios de combinaison d'activités forestières avec des activités agricoles. Des systèmes agroforestiers bien raisonnés pourraient constituer l'une des voies de diversification de l'agriculture.

1 Un outil de la gestion durable : l'aménagement forestier

La forêt constitue une ressource naturelle lentement renouvelable. Sa complexité écologique, la lenteur de sa croissance, son caractère biologique, impliquent d'en réaliser une gestion sophistiquée, largement planifiée, ancrée à la fois dans l'espace et dans le temps. On appelle "aménagement forestier" la planification de la gestion forestière ; celle-ci s'appuie sur des considérations à très long terme, fréquemment de l'ordre d'un à deux siècles, qui conduisent à des prescriptions plus précises, concrètes et formelles relatives à des périodes de 10 à 30 ans.



Recherche sur la croissance des taillis dans la région Centre. Suivi et mesure après arrêt de la végétation dans les taillis expérimentaux de l'INRA Orléans.

Photo : © O. Sébart

Une démarche à la fois ancienne et actuelle

Aménager une forêt, c'est étymologiquement l'adapter aux besoins du ménage, de son propriétaire, ou, par extension, de la société. Ce sens du mot "aménagement" est d'ailleurs l'un des plus primitifs. L'aménagement forestier est en effet une discipline particulièrement ancienne. Son esprit est déjà celui de l'ordonnance signée à Brunoy le 29 mai 1346 par Philippe VI de Valois, Roi de France : "*Les Maîtres des Forêts [...] enquerront et visiteront toutes les forêts et bois qui y sont et feront les ventes qui y sont à faire, eu regard à ce que lesdites forêts et bois se puissent perpétuellement soutenir en bon état*". Autour de ce concept, s'est progressivement constituée une véritable "culture forestière" qui transcende, sinon dans les termes, du moins dans les faits, les catégories de propriétaires, et qui s'est largement propagée à d'autres domaines que la forêt.

L'ancienneté de la notion d'aménagement forestier ne signifie pas que celle-ci doive rester figée. L'évolution des préoccupations de la société, et l'émergence de nouveaux modes d'approche, conduisent tout naturellement à analyser la façon dont la seconde peut permettre de mieux prendre en compte la première. Telle est, en quelque sorte, la finalité des recherches appliquées à l'aménagement forestier ; elle nécessite, notamment, des méthodes dites quantitatives parce qu'elles reposent sur une formulation et des outils mathématiques.

Améliorer l'innocuité et l'efficacité des interventions humaines en forêt

La gestion forestière consiste à pratiquer des interventions, coupes et travaux, dans les divers peuplements d'une forêt, selon une cadence et un ordre précis. Ces interventions répondent à de multiples critères.

Les premiers sont indéniablement des **critères écologiques**. L'adaptation des essences au milieu naturel, à la "station", est particulièrement importante parce qu'elle

sous-tend l'ensemble des fonctions de la forêt, que celles-ci soient de protection, de production, ou d'accueil du public. Mais on peut citer aussi la conservation des sols, de la faune et de la flore, que l'on retrouve sous l'acception de "biodiversité". On peut invoquer encore la santé des arbres face aux attaques des polluants, champignons pathogènes ou autres insectes, et la résistance des peuplements aux principales agressions : vent, neige, incendies, grands herbivores... On peut mentionner enfin le bilan en certains éléments chimiques : le carbone, dont le piégeage dans le bois est bénéfique ; les éléments minéraux, dont l'exportation hors de la forêt est susceptible d'entraîner un appauvrissement du milieu ; l'eau, dont les liaisons avec la végétation sont multiples, ... La recherche d'un équilibre biologique global au niveau d'une forêt est également un critère très fréquemment utilisé, même si l'aménagement ne poursuit pas forcément ce but de façon prioritaire.

On se réfère aussi à des **critères économiques**. Ils portent notamment sur la croissance et la productivité des peuplements, voire sur leur rentabilité, et concernent donc les coûts de gestion et d'intervention, le prix du bois ou d'autres produits fournis par la forêt : biens alimentaires, biens médicaux, revenus de la chasse, éléments de décoration, résines, liège, essences de parfumerie, ... Ils comprennent également le nombre d'emplois que les activités forestières directes ou indirectes entretiennent. La régularité des recettes et dépenses engendrées par la forêt est souvent recherchée ; elle est aux critères économiques ce que l'équilibre biologique global est aux critères écologiques.

Enfin, on peut rassembler dans une dernière catégorie des **critères à caractère culturel et social affirmé**. La qualité du paysage forestier interne est favorable à la pratique de nombreux loisirs en forêt ; sa beauté externe participe grandement au développement du tourisme d'une région. La protection des personnes contre différentes nuisances sonores ou visuelles joue un rôle important. La conscience que les forêts constituent l'un des derniers refuges de la naturalité est un sentiment fort qui explique une large part des rapports entre l'homme et la forêt. À l'instar des considérations écologiques ou économiques, les préoccupations sociales font que l'invariance globale à long terme de la forêt apparaît souhaitable en de nombreuses circonstances.

Ces critères ont une importance qui dépend de la situation rencontrée. Certains d'entre eux relèvent par exemple clairement des politiques publiques plus que de politiques privées : la pureté de l'air, la création d'emplois, la qualité du paysage externe. C'est dire que chaque propriétaire utilise différemment ces critères pour se fixer sa propre stratégie. Contrairement à ce que certains voudraient parfois faire croire, l'aménagement forestier est par essence une démarche qui doit être appliquée à chaque cas particulier, et qui ne saurait, par conséquent, être normative.

À partir de ces critères, un propriétaire enserre tout d'abord sa stratégie à l'intérieur de contraintes, qui délimitent les actions qui vont être possibles ou acceptables. Puis, à l'intérieur de ce cadre, il peut penser améliorer un objectif de son choix.

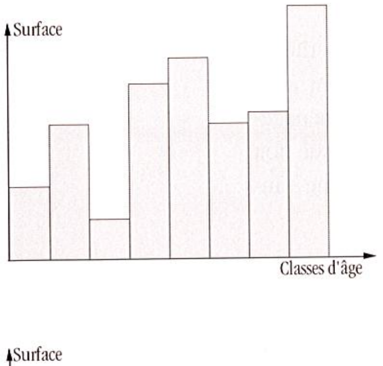
Dans certains cas, les contraintes sont essentiellement écologiques ou sociales ; il s'agit, parfois, de préférer une essence locale, intégrée dans le paysage, accompagnée d'un riche cortège végétal et animal, à une essence plus productive, mais introduite et présentant des risques ; il s'agit, en d'autres circonstances, d'obtenir un équilibre global de la forêt au cours du temps, apprécié à partir de la répartition des classes d'âge, ou de celle des diamètres ; ces contraintes fixent ainsi les limites à l'intérieur desquelles le gestionnaire tente ensuite d'améliorer un objectif économique donné, par exemple le revenu de la forêt ; si les contraintes sont faibles, la gestion a alors un caractère économique affirmé ; si au contraire les contraintes sont fortes, l'objectif économique peut sembler dérisoire, et la gestion possède surtout un caractère écologique ou social. Dans d'autres cas, les contraintes sont économiques ; elles consistent par exemple à assurer un revenu suffisant pour financer un objectif écologique ou social ; ce dernier est d'autant plus affirmé que le revenu le permet ; mais une gestion trop productiviste risque d'altérer un équilibre écologique fragile ou de décourager la demande sociale.

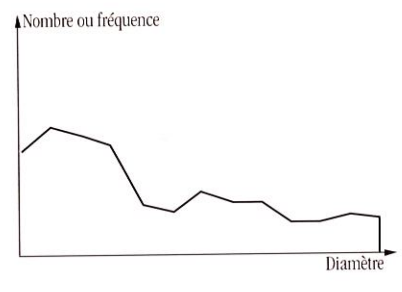
On voit bien qu'il s'agit avant tout de concilier, de façon plus ou moins équilibrée, de multiples critères de gestion appartenant aux domaines écologique, économique et social.

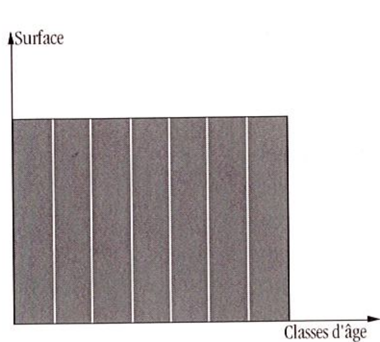
Finalement, les recherches appliquées à l'aménagement forestier ont pour objet d'élaborer des méthodes permettant de traiter de tels problèmes d'amélioration d'une gestion selon un critère objectif bien déterminé et des contraintes parfaitement identifiées.

Une gestion raisonnée dans l'espace et dans le temps

Pour un ensemble donné d'arbres, la démarche d'aménagement forestier se décompose dans le temps en







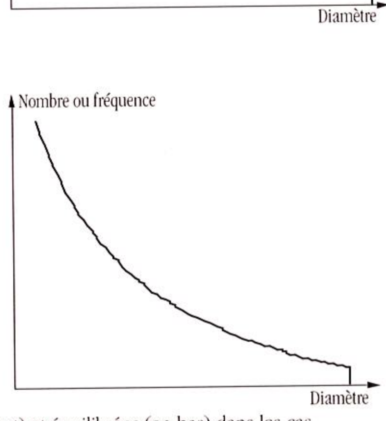


Figure 1 • Représentation de structures courantes (en haut) et équilibrées (en bas) dans les cas "équienne" (à gauche) et "inéquienne" (à droite) : l'histogramme en haut et à gauche se rapporte à une forêt excédentaire en peuplements âgés, tandis que l'histogramme en bas et à gauche caractérise une forêt équilibrée en classes d'âge, et peut symboliser l'objectif à long terme recherché pour la forêt représentée au dessus ; de la même façon, la courbe de fréquence des diamètres des arbres en haut et à droite est celle d'une forêt plutôt excédentaire en gros bois si l'équilibre est caractérisé par la courbe située en bas et à droite, susceptible de se perpétuer à l'identique dans le temps grâce au prélèvement en coupe de l'accroissement.

deux étapes :

• le long terme dépasse la durée au bout de laquelle l'ensemble d'arbres peut être entièrement renouvelé : à un tel horizon, toutes les modifications réalistes sont envisageables ; le propriétaire fixe l'état-objectif ; il n'est pas contraint par l'état actuel ;

• le court terme est inférieur à la durée de renouvellement de l'ensemble d'arbres : il convient de gérer l'existant qui constitue une contrainte à la réalisation de certaines modifications ; le propriétaire s'efforce d'assurer la meilleure transition possible vers l'état-objectif à long terme.

La gestion forestière possède également un fort caractère spatial, qui se combine aux aspects temporels dans la notion de structure. Au niveau d'un petit ensemble d'arbres de quelques ares à quelques hectares, c'est-à-dire d'un peuplement, on distingue deux types de structures :

• la structure équienne (ou régulière) pour laquelle les arbres du peuplement ont tous le même âge ou approximativement le même âge ; la réunion de tous les âges ne peut se rencontrer qu'au niveau d'un ensemble de peuplements, c'est-à-dire d'une forêt ; on représente en général cette structure sous la forme d'un histogramme des surfaces par classes d'âge tel que ceux de la partie gauche de la figure 1 ;

• la structure inéquienne pour laquelle un peuplement comprend des arbres d'âge divers et généralement d'essences variées ; dans ce type de structure, il n'est plus possible de raisonner en surface par classes d'âge, car ceci nécessiterait de mesurer l'âge de chaque arbre, ce qu'il n'est pas envisageable de réaliser de manière courante dans l'état actuel des techniques ; on se réfère donc à une courbe de fréquence des diamètres telle que celles de la partie droite de la figure 1.

Cette distinction induit des modes de gestion bien différenciés.

Planification de la gestion des peuplements équiennes

L'aménagement d'une forêt nécessite au préalable un important travail d'analyse, qui s'applique aux milieux naturels dans lesquels croissent les peuplements, aux caractéristiques quantitatives et qualitatives de ces derniers tels qu'ils se présentent aujourd'hui, mais aussi, autant que possible, tels qu'ils ont évolué, enfin à l'environnement socio-économique et culturel.

L'analyse des milieux naturels permet de déterminer des zones homogènes du point de vue du milieu naturel, donc des essences-objectif possibles, de leurs conditions de croissance, de leur impact sur les critères écologiques, économiques, et socio-culturels identifiés auparavant. Pour chacune de ces zones homogènes, et en fonction de la stratégie qui a été définie, le propriétaire ou son gestionnaire détermine la meilleure gestion sylvicole possible à long terme, c'est-à-dire pour les peuplements qui prendront la suite des peuplements actuels. Il s'agit en particulier de choisir les essences à favoriser, leur densité souhaitable après quelques années (densité de plantation dans le cas d'un reboisement, densité après sélection des meilleurs arbres ou élimination des moins bons dans le cas d'une régénération naturelle), ainsi que le calendrier, le poids, voire la nature des éclaircies qu'il faudra réaliser pour réduire progressivement le nombre d'arbres jusqu'au stade du peuplement final prêt à être récolté.

Divers peuplements, différant par leurs essences, leur âge, ... occupent les zones homogènes dont il vient d'être question. Chacun d'eux pourrait faire l'objet de la meilleure gestion possible jusqu'à sa récolte, après laquelle le peuplement objectif à long terme serait mis en place puis géré. Cependant, une telle gestion s'avère souvent incompatible avec des buts globaux que le propriétaire entend poursuivre, non plus au niveau de



Photo : M. Adrian

chaque peuplement considéré isolément, mais à celui de l'ensemble de sa forêt, tels que le maintien d'un équilibre biologique global, la recherche d'une certaine régularité des dépenses et des recettes, la prise en compte d'une interdépendance entre les opérations envisagées dans des peuplements voisins, ... Même s'il

convient aujourd'hui de concevoir l'aménagement forestier de façon beaucoup plus large, il s'avère ainsi qu'un objectif global à long terme consiste souvent à conduire la forêt vers une structure équilibrée des classes d'âge, comme le montre la figure 1 en bas et à gauche. Un tel objectif à long terme exige de s'écarter, à court terme et pour certains peuplements, de la gestion qui leur aurait été la plus appropriée, et représente un coût dénommé "sacrifices d'exploitabilité", qui reste généralement réduit, mais qu'il peut être intéressant de mesurer.

Planification de la gestion des peuplements inéquiennes

Une grande partie des principes développés précédemment pour les peuplements équiennes se retrouvent pour les peuplements inéquiennes ; mais leurs modalités d'application dépendent évidemment beaucoup du nouveau contexte dans lequel ils doivent s'insérer. L'analyse des milieux naturels, des peuplements, et de l'environnement culturel et socio-économique reste évidemment nécessaire. Cependant, plus que dans le cas "équienne", la recherche d'une structure équilibrée est associée au concept d'aménagement forestier. Cet équilibre est défini au niveau de chaque zone homogène, mais, compte tenu du mélange intime et omniprésent des essences et des grosseurs d'arbres, il est destiné à être appliqué à chaque peuplement. Ainsi, dans le cas "inéquienne", les principaux buts globaux que le propriétaire est susceptible de poursuivre sont assignés à chaque peuplement, et non plus au seul niveau de l'ensemble de la forêt.

Dans ces conditions, l'équilibre à long terme est défini pour chaque peuplement à l'aide d'un type de structure, tantôt donné par un type de peuplement issu d'une typologie générale, tantôt représenté plus précisément par une courbe de fréquence des diamètres semblable à celle de la figure 1, en bas et à droite. Dans les deux hypothèses, cette structure est évidemment choisie de façon à correspondre au mieux aux critères de gestion du propriétaire.

Pour un peuplement équilibré selon l'objectif choisi, il suffit de fixer la périodicité des coupes (dite "rotation") dont on déduit automatiquement le nombre d'arbres à récolter dans chaque classe de diamètre pour retrouver l'état immédiatement postérieur à la coupe précédente. Le volume prélevé est alors égal à l'accroissement des arbres sur la période, diminué d'une éventuelle mortalité (accroissement net). Ainsi, après chaque coupe, le volume et les effectifs sur pied dans chaque classe de diamètre sont stables.

Pour un peuplement qui n'est pas équilibré selon l'objectif choisi, il importe de réaliser les coupes de manière à se rapprocher progressivement de ce dernier. Il s'agit en particulier de récolter plus ou moins que l'accroissement net selon que le volume objectif est inférieur ou supérieur au volume actuel, et de le faire de préférence au détriment des classes de diamètre dont les effectifs sont surnuméraires.

En conclusion

La recherche en aménagement forestier porte en particulier sur l'élaboration de méthodes quantitatives qui ont le grand intérêt, comme l'indique leur nom, de mesurer les effets d'une gestion par rapport à une autre. Ainsi, la connaissance d'un optimum économique n'est pas seulement utile aux gestionnaires recherchant une bonne rentabilité ; elle permet aux autres d'estimer le coût qu'ils assument en prenant une décision différente. Une telle mesure n'est certes pas inutile à un moment où s'exerce une pression incontestable en faveur d'une gestion plus collective de l'ensemble des forêts, indépendamment des considérations de propriété. Nul doute qu'un débat objectif et équilibré entre forestiers et groupes de pression nécessite une information la plus complète et précise possible, à laquelle concourent manifestement ces méthodes quantitatives.

L'aménagement forestier constitue un cadre de travail pour la gestion courante. Ses indications sont précieuses mais ne doivent pas pour autant supprimer toute liberté d'action au gestionnaire. Cantonné dans son rôle stratégique, il reste un outil original et indispensable à la culture forestière. Mais il doit s'adapter aux nouvelles conditions, régler des questions plus nombreuses, traiter des problèmes plus délicats et, pour cela, évoluer sans cesse. Les méthodes quantitatives sont une des facettes de cette évolution.

Une telle approche établit un débouché important pour d'autres travaux scientifiques, en particulier pour ceux qui visent à élaborer des modèles de croissance. Elle constitue ainsi certainement un des facteurs de développement des recherches forestières.

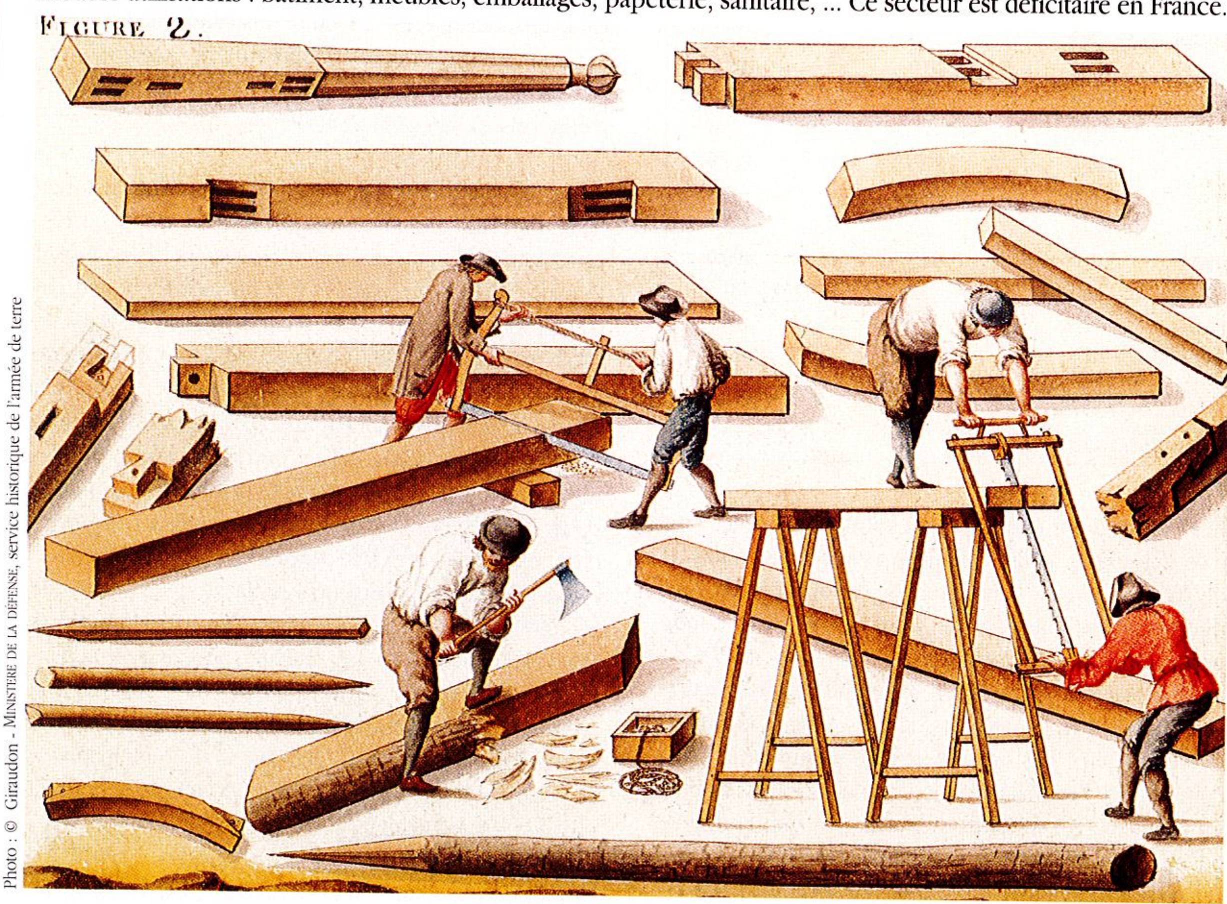
Jean-Luc Peyron,
Économie et Politique
Agricole et Forestière, ENGREF-INRA,
14 rue Girardet 54042 Nancy cedex ■

Pour en savoir plus

• Bourgenot L., 1973. Forêt vierge et forêt cultivée. Revue forestière française, n°5-1973, pp. 339-360.
• Dubourdieu J., 1989. Manuel d'aménagement (3ème édition). Paris-Fontainebleau : Office national des Forêts, 151 p. (une quatrième édition est en préparation).
• Huffel G., 1926. Les méthodes de l'aménagement forestier en France ; étude historique. Nancy-Paris-Strasbourg : imprimerie Berger-Levrault, 231 p.
• Lafouge C. & Monomakkoff P., 1991. L'action raisonnée du forestier. *In : L'Atlas des forêts de France.* Paris : Éditions Jean-Pierre de Monza, ouvrage coordonné par Jean Gadant, pp. 131-140.

2 La forêt et les industries forestières, sources d'emploi

La filière forêt-bois en France recouvre un ensemble de secteurs d'activités : gestion et exploitation forestières, industries de première et de seconde transformations du bois. Les produits à base de bois trouvent de nombreuses utilisations : bâtiment, meubles, emballages, papeterie, sanitaire, ... Ce secteur est déficitaire en France.

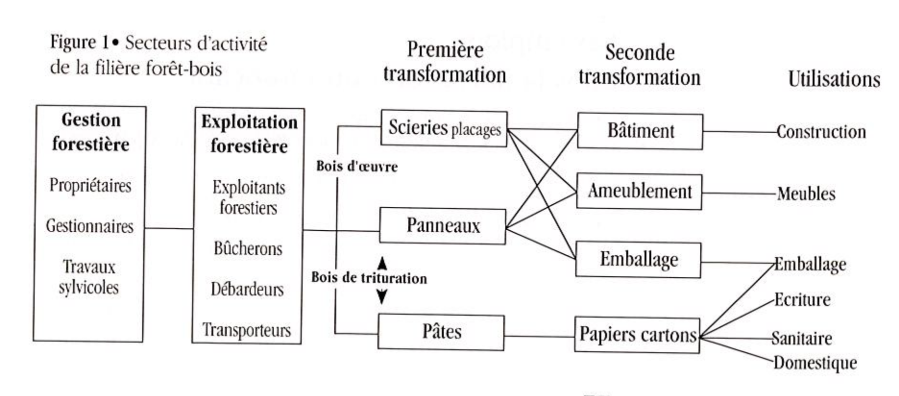


Traité de fortifications, scieurs de long. Dessin de Claude Masse (1652-1737), France. Service historique de l'armée de terre, Vincennes.

La filière forêt-bois en France

Le concept de filière forêt-bois recouvre l'ensemble des activités de production, d'exploitation, de transformation et de commercialisation des bois (figure 1) qui permettent, au long d'une chaîne technologique, de gérer les ressources forestières, de mobiliser la matière première et de la traiter afin d'assurer la satisfaction des besoins de consommation des ménages. Ceux-ci s'élèvent actuellement en France, hors bois de feu, à environ 61 millions de m^3 équivalents bois ronds (m^3 ebr = estimation du volume de bois brut nécessaire à la fabrication d'un produit dérivé du bois) par an soit sensiblement $1m^3$ ebr par habitant et par an. La récupération, notamment de vieux papiers, assure le quart de ces besoins (16 millions de m^3 ebr), les trois quarts (45 millions de m^3 ebr) provenant de la transformation de bois bruts. Une moitié d'entre eux correspond à des bois d'oeuvre (industrie du sciage, du tranchage et du déroulage), une autre à des bois de trituration (industries des panneaux et des pâtes à papier). La récolte nationale de bois bruts industriels s'élève actuellement (moyenne 1988/1993) à environ 32 millions de m^3 (70% des besoins en bois bruts) dont 22 millions de m^3 de bois d'oeuvre (la quasi totalité des besoins, mal répartis cependant entre feuillus et résineux) et 10 millions de m^3 de bois de trituration (la moitié des besoins). Au total, la filière forêt-bois française présente, en raison de la forte concurrence qu'exercent sur un marché mondial très ouvert les grands pays producteurs (Amérique du Nord et Scandinavie notamment), un déficit structurel d'environ 13 millions de m^3 ebr en volume. En valeur, les principaux postes déficitaires sont, par ordre décroissant, les pâtes et papiers-cartons, les meubles et les sciages résineux. En 1994, le déficit extérieur de la filière forêt-bois française s'est élevé à 12 milliards de francs.

Figure 1 • Secteurs d'activité de la filière forêt-bois



Estimation du travail dans la filière forêt-bois (milliers d'équivalents plein temps) en 1991

Secteurs d'activité	Emplois salariés	Activités non salariées	Travail total
• sylviculture et services aux forêts	16,1	50,0 (1)	66,1
• exploitation forestière	7,0	21,0 (2)	28,0
total secteur primaire	**23,1**	**71,0**	**94,1**
• travail mécanique du bois	92,0	6,5	98,5
dont scierie	23,5	3,0	26,5
dont panneaux,placages, imprégnation	12,5		12,5
• industrie de l'ameublement	89,8	20,0	109,8
• industrie du papier et du carton	105,8	0,8	106,6
dont pâtes à papier	2,0		2,0
total secteur secondaire	**287,6**	**27,3**	**314,9**
dont première transformation	38,0	3,0	41,0
dont seconde transformation	249,6	24,3	273,9
total secteurs primaire et secondaire	**310,7**	**98,3**	**409,0**
• bâtiment bois	108,1	23,8	131,9
• commerce des produits dérivés du bois	82,5		82,5
total secteurs primaire, secondaire et tertiaire	**501,3**	**122,1**	**623,4**

Sources : Enquête statistique sur les structures économiques de la sylviculture, Office National des Forêts, Mutualité Sociale Agricole, Enquête de branche exploitation forestière et scierie, UNEDIC, enquête artisanat.
(1) travail des propriétaires forestiers privés en équivalent plein temps.
(2) exploitants forestiers et entrepreneurs indépendants sous-traitants (bûcherons, débardeurs).

Cette filière de production et de transformation des bois crée une valeur ajoutée annuelle estimée à 80 milliards de francs si on ne considère que les activités de production, d'exploitation, de première et de seconde transformation, et à 125 milliards de francs (soit 1,7% du produit intérieur brut) si on y rajoute la construction (mise en oeuvre de produits du bois dans le bâtiment) et le commerce des bois. Pour les secteurs de la sylviculture et de l'exploitation forestière cette valeur ajoutée est estimée à 8,5 milliards de francs ; ce qui représente en moyenne 610 francs par hectare de surface boisée (environ 14 millions d'ha) ou encore 260 francs par m^3 de bois industriel récolté. La commercialisation des bois constitue ainsi, avec (à un degré sensiblement moindre) la chasse, la principale source de revenu des gestionnaires forestiers. Elle leur permet de disposer des revenus nécessaires à l'entretien et au renouvellement des espaces boisés. Plus généralement, les ressources monétaires procurées par les utilisations des produits dérivés du bois par les ménages permettent de rémunérer, tout au long de la chaîne de transformation, les facteurs de production nécessaires et notamment l'emploi.

Les emplois dans la filière forêt-bois française

La mesure de l'emploi dans la filière forêt-bois est confrontée à diverses limites liées à l'aspect essentiellement patrimonial de la gestion d'une grande partie des ressources forestières (forêt privée représentant les trois quarts de la surface boisée totale), au caractère très artisanal de nombreux secteurs d'activité et aux fortes variations conjoncturelles que connaît la consommation des produits dérivés du bois. Aussi les résultats présentés dans le tableau ci-contre, qui résultent d'un arbitrage entre des sources diverses, doivent-ils être considérés comme des ordres de grandeur. Compte tenu de ces caractéristiques, il est en outre essentiel de distinguer l'emploi salarié du travail non salarié (propriétaires forestiers, artisans et entrepreneurs indépendants, chefs d'entreprises), plus délicat à estimer.

Si on fait abstraction du travail des propriétaires forestiers, dont l'estimation est très grossière et qui ne correspond généralement pas à une activité professionnelle, le total des emplois associés à la filière forêt-bois serait d'environ 570.000 dont 90% d'emplois salariés. Dans ce total, plus du tiers (38%) correspond à des emplois de service dans la construction et le commerce de gros ou de détail. Leur rattachement aux activités de transformation des bois est assez délicat en raison des nomenclatures statistiques et de la diversité des matériaux utilisés par les entreprises de ces secteurs. L'emploi correspondant aux seules activités de production, d'exploitation et de transformation des bois serait alors de l'ordre de 360.000 équivalents plein temps, dont 310.000 emplois salariés. Ces emplois des secteurs primaires et secondaires se répartissent selon les étapes de transformation à raison de 44.000 emplois pour la sylviculture (16.000) et l'exploitation forestière (28.000), 41.000 emplois pour la première transformation, 274.000 emplois pour la seconde transformation.

La part du travail en forêt (sylviculture, exploitation) ne représente ainsi que 12% de l'ensemble des emplois des secteurs primaire et secondaire de la filière forêt-bois. Cette répartition est nettement différente de celle qu'on observe dans le **secteur agricole** où l'agriculture occupe 1,2 millions de personnes et les industries agro-alimentaires la moitié. On estime ainsi que 1.000 ha de surface boisée procurent 1 emploi en sylviculture et 2 emplois en exploitation forestière alors que l'emploi agricole représente 40 équivalents plein temps pour 1 000 ha de surface agricole utilisée. Il est vrai cependant que **l'emploi agricole** est fortement soutenu par la collectivité nationale et européenne, ce qui est beaucoup moins le cas en matière forestière. Au niveau des industries d'aval, le secteur agricole et le secteur forêt-bois présentent toutefois la même importance relative : environ 20 emplois pour 1.000 ha (de surface agricole ou de surface boisée). On peut aussi estimer que l'exploitation de 1 million de m^3 de bois bruts engendre près de 850 emplois en exploitation forestière et près de 10.000 emplois dans les secteurs industriels. On conçoit alors le double intérêt pour la société (réduction du déficit extérieur, création d'emplois) d'une amélioration du fonctionnement de la filière forêt-bois française.



Raboteurs de parquet. Gustave Caillebotte (1848-1894). Musée d'Orsay.

La filière forêt-bois dans l'emploi total et son évolution

Les 310.000 salariés employés dans les secteurs primaire et secondaire de la filière forêt-bois représentent 1,5% de l'emploi salarié total. Il est vrai que celui-ci est très majoritairement (68%) constitué d'activités tertiaires de services et de commerce. Comparée aux seuls secteurs agricole et industriel, la filière forêt-bois représente alors environ 5% des emplois salariés. Tout en restant modeste, cette part apparaît indiscutablement significative. D'autant plus qu'en terme d'emploi total, le secteur de la production, de l'exploitation et de la transformation des bois est comparable à des secteurs tels que l'industrie automobile ou l'industrie textile, et largement supérieur à ceux de l'industrie du plastique, l'industrie du verre, l'industrie du cuir, l'industrie chimique de base ou encore la sidérurgie.

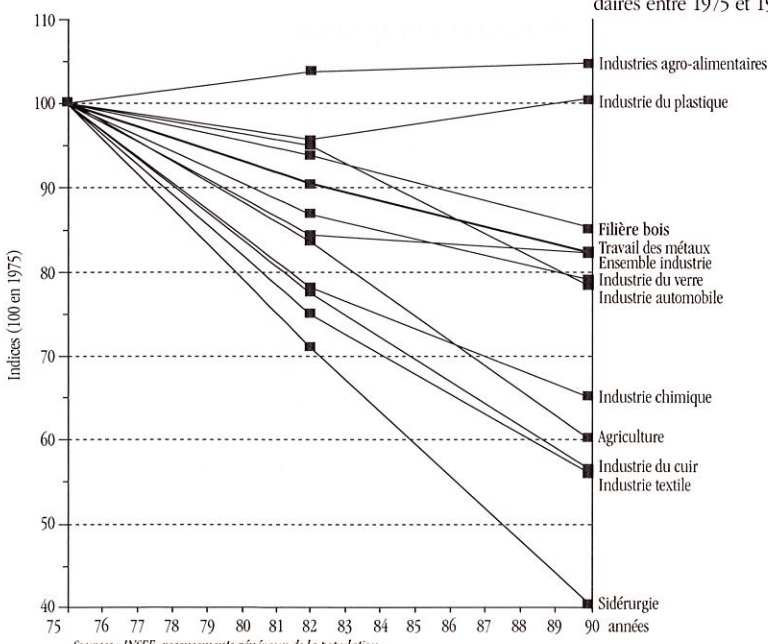
Par ailleurs, bien que soumise à une très vive concurrence internationale, la filière forêt-bois française n'a subi au cours des deux dernières décennies qu'une réduction limitée de ses emplois (figure 2). Celle-ci s'avère comparable à celle de l'ensemble de l'industrie. Seuls des secteurs comme les industries agro-alimentaires ou du plastique ont connu une progression de leurs effectifs au cours de cette période. Dans les autres cas, qu'il s'agisse de l'agriculture, de biens de première transformation ou de biens d'équipement et de consommation, les pertes d'emplois ont été souvent beaucoup plus notables que pour la filière forêt-bois. Cela traduit une assez bonne résistance de ce secteur à la crise, sans doute liée en partie à la qualité des ressources forestières françaises et de leur mise en valeur. L'enjeu pour la recherche est alors de déterminer les moyens techniques et économiques permettant de conforter ce secteur, important pour l'aménagement du territoire dans certaines zones rurales où les activités créatrices d'emplois sont rares, en améliorant sa compétitivité tout en respectant les contraintes écologiques et sociales auxquelles la gestion des ressources forestières doit répondre.

Dominique Normandin, Jean-Luc Peyron,
Économie et Politique agricole et forestière, ENGREF-INRA,
14, rue Girardet 54042 Nancy cedex ■

Pour en savoir plus

• H. Daly-Hassen, J.L. Peyron. L'emploi salarié dans la filière-bois française : situation et évolution récente. Revue forestière française, n°2, 1996, pages 153-166.
• Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. Graph forêt bois. Agreste, service central des enquêtes et études statistiques, septembre 1994, 70 pages.

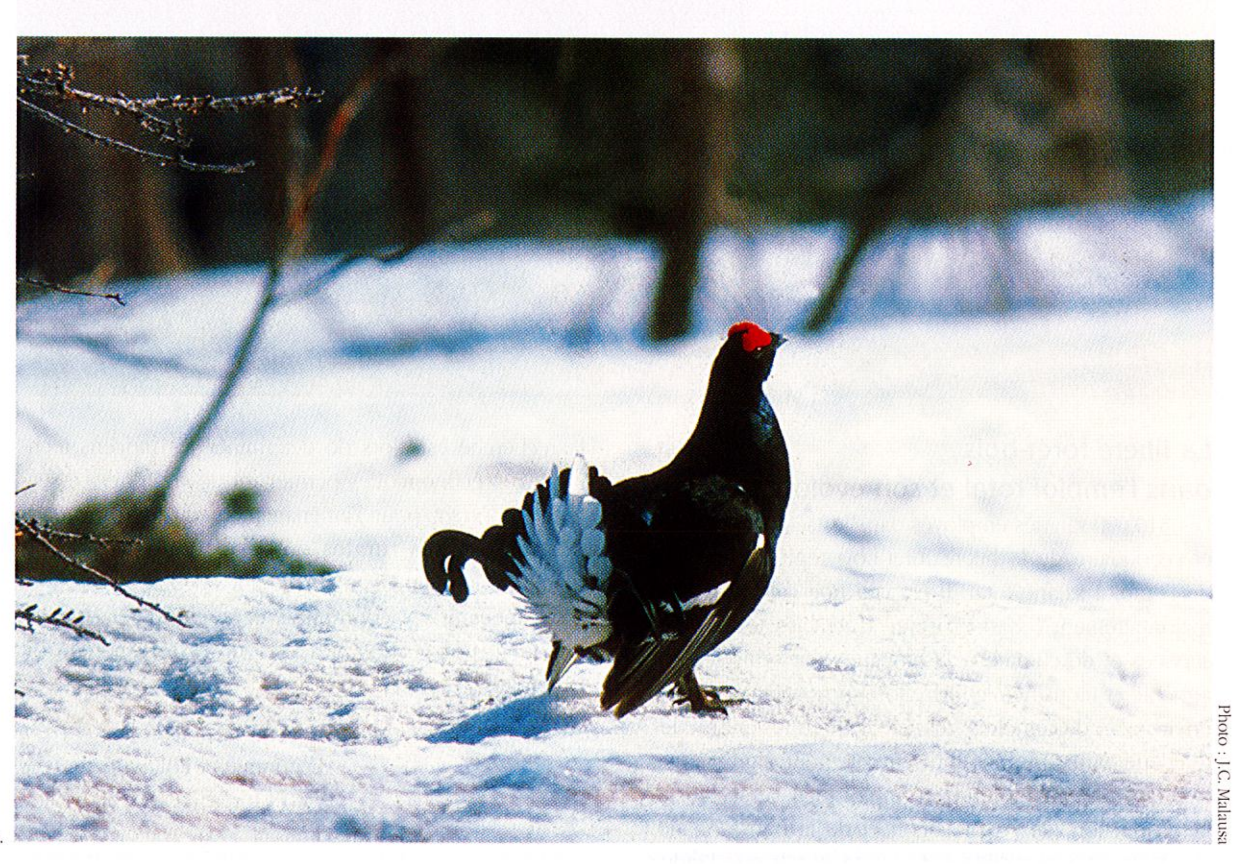
Figure 2• Evolution des emplois dans la filière forêt-bois et dans d'autres secteurs primaires ou secondaires entre 1975 et 1990



Sources : INSEE, recensements généraux de la population.

3 Les forêts productrices de biens et de services non-marchands

La forêt procure à la société un grand nombre de biens et services. Elle constitue d'abord le réservoir d'une matière première renouvelable - le bois - utilisée depuis longtemps par l'homme pour ses besoins de logement, de transport, d'outillage, de support d'écriture ou d'énergie. Elle lui fournit également divers autres produits végétaux (résine, liège, branchages et feuillages, champignons, ...) ou animaux (gibier, ...). Mais elle participe aussi de façon importante au maintien des équilibres écologiques, à la formation des paysages et constitue un espace de détente d'autant plus apprécié que les modes de vie s'insèrent dans un contexte d'urbanisation et d'industrialisation croissantes.


Photo : J.C. Malausa

Mâle de tétras-lyre paradant.

Protection et gestion des ressources boisées

Avec l'augmentation progressive de la population, et donc des besoins de la société, il s'est avéré nécessaire, plus ou moins tôt selon les régions du monde et l'importance de leurs ressources forestières, de protéger et de gérer les espaces boisés. C'est ainsi qu'en France des mesures ont été prises depuis longtemps (1860) pour éviter le défrichement des forêts. Des méthodes ont également été mises au point pour gérer les ressources forestières afin de permettre leur renouvellement et assurer, notamment, la pérennité de l'approvisionnement en bois. On s'est d'abord efforcé de contrôler les prélèvements afin de les rendre compatibles avec la dynamique naturelle de la végétation. L'accroissement des besoins en quantité et en qualité a ensuite rendu nécessaire le recours à des techniques permettant d'accroître la production naturelle et de l'orienter vers les produits forestiers les plus conformes aux exigences des industries de transformation des bois et donc à la satisfaction des besoins de consommation. C'est l'objet de la sylviculture qui suppose des investissements élevés et portant à très long terme de la part des agents, publics ou privés, chargés de la conduire.

Aujourd'hui, si la protection des espaces boisés est loin d'être assurée partout (cas des forêts tropicales notamment), les forêts françaises ne sont pas menacées de réduction. En liaison avec la déprise agricole elles ont au contraire connu une forte extension, en particulier depuis le milieu du siècle, passant de 11 millions d'ha en 1945 à plus de 14 millions d'ha en 1990. Cet accroissement des surfaces boisées, certes inégal selon les régions, a d'ailleurs été favorisé par l'action du Fonds Forestier National qui a aidé le boisement ou le reboisement de plus de 2 millions d'ha depuis 1946. Actuellement, dans un contexte de surproduction agricole, l'extension forestière se poursuit à un rythme

d'environ 20.000 ha/an. Il est vrai cependant que, parallèlement, les exigences de la productivité agricole ont entraîné une réduction importante des haies boisées et des alignements d'arbres. Le souci de promouvoir une agriculture plus respectueuse de l'environnement et la prise de conscience de l'importance écologique et paysagère de ces formations boisées conduit maintenant à mieux les protéger, et même à les reconstituer lorsqu'elles ont disparu. Quant aux bois et forêts proprement dits, ils font l'objet, parfois depuis très longtemps, d'une gestion largement encadrée par la puissance publique qui permet d'assurer leur pérennité. Les résultats de l'Inventaire Forestier National permettent ainsi d'estimer que le volume de bois sur pied dans les forêts françaises connaît actuellement un accroissement net (écart entre production biologique et récolte) d'environ 20 millions de m^3 par an. Elles ne sont donc pas surexploitées que ce soit par les prélèvements domestiques (bois de chauffage) ou par l'exploitation industrielle.

Arbitrage entre production de bois et services non marchands

La principale question qui se pose aujourd'hui en France est de déterminer les modes de gestion des ressources forestières qui leur permettront de fournir durablement l'ensemble des biens et services que la société en attend. D'un côté, la forêt française, qui occupe le quart du territoire national, approvisionne une filière-bois, d'ailleurs déficitaire en valeur, procurant (hors commerce et bâtiment) plus de 300.000 emplois, souvent en zones rurales. À une époque où l'agriculture perd près de 50.000 emplois par an, les activités de production, d'exploitation et de transformation du bois représentent ainsi un enjeu important d'aménagement de l'espace rural. Elles constituent en outre actuellement la principale source de revenu des gestionnaires forestiers, leur permettant de réaliser les investissements nécessaires à l'entretien et au renouvellement des ressources boisées. Ces activités sont cependant soumises à une très vive concurrence internationale de la part de pays aux ressources plus abondantes et, souvent, gérées de façon moins durable que la forêt française. Les contraintes d'un approvisionnement compétitif des industries de transformation du bois plaident donc pour une intensification et une rationalisation de la production ligneuse. D'un autre côté, on assiste à un fort développement des préoccupations de préservation et d'amélioration de la qualité de l'environnement. Elles se traduisent en matière forestière par le désir d'une gestion des ressources boisées la plus proche possible des processus naturels et s'insèrent dans un contexte international (conférences de Rio, d'Helsinki) où les stratégies commerciales des grands pays producteurs de bois ne sont pas absentes. Ce souci, d'ailleurs légitime et qui s'exprime principalement en terme de maintien de la biodiversité et de préservation des paysages, conduit souvent à accroître les contraintes de l'approvisionnement en bois des industries.

Il est donc nécessaire que la société effectue des arbitrages entre la production économiquement compétitive d'une matière première indispensable dont la mise en oeuvre s'avère souvent moins dégradante de l'environnement que celle de matériaux concurrents (plastiques, métaux, ...) et une gestion moins productiviste des forêts. Les termes de ces arbitrages sont cependant délicats et font l'objet de débats parfois vifs. D'une part, parce que les données scientifiques sur le fonctionnement de l'écosystème complexe qu'est la forêt sont encore incomplètes. Il est alors difficile de mesurer objectivement la totalité des conséquences de différents modes de gestion forestière. D'autre part, parce que l'ensemble des services écologiques et sociaux procurés par les forêts ne s'insèrent pas dans le cadre de l'économie de marché : il s'agit "d'externalités" (effets externes au marché). Les gestionnaires forestiers, privés ou publics, ne sont alors pas incités à produire ces services pour lesquels ils ne sont pas rétribués. En l'absence d'un indicateur visible de valeur (prix) il est en outre difficile d'apprécier les caractéristiques et le niveau exacts de la demande sociale, d'évaluer les bénéfices obtenus et de les comparer avec les coûts directs ou indirects (limitation des usages marchands) qu'entraîne la gestion des services non marchands. La mise en place de procédures d'arbitrage s'en trouve fortement compliquée.

Analyse économique et gestion des services non marchands des forêts

Traditionnellement l'analyse économique traite des relations marchandes entre les individus. L'accroissement des préoccupations de protection de l'environnement, qui devient un bien rare, a amené l'économie à développer des méthodes d'analyse adaptées aux services non marchands. Elles reposent essentiellement sur l'estimation des bénéfices procurés par la conservation des actifs naturels, c'est-à-dire de la valeur que la société leur accorde. Pour cela il faut déjà définir les biens considérés et caractériser la nature des services qu'ils procurent. La formation de la valeur de ces biens et les méthodes d'estimation utilisées tiennent en effet



Photo : Pascale Inzérillo

d'abord aux fonctions qu'ils remplissent. On distingue habituellement ceux qui donnent lieu à un usage (direct ou indirect) et ceux qui ne font pas l'objet d'une utilisation concrète et immédiate (non-usage). Dans ce cas, les motifs de préservation de l'environnement correspondent au désir de conserver la disponibilité ultérieure du bien pour soi-même (valeur d'option) ou pour les générations futures (valeur de legs). On conçoit la difficulté d'une estimation monétaire de tels objectifs qui présentent souvent une forte dimension éthique. Par ailleurs, la détermination de la "disposition à payer" de la société suppose que l'on identifie les individus concernés. Or, les biens d'environnement appartiennent généralement à la catégorie économique des biens publics : ils peuvent être "consommés" en même temps par plusieurs individus. Cela entraîne des difficultés particulières de repérage des agents intéressés, d'appréciation de leurs préférences, de détermination de leur solvabilité et des modes de financement à envisager.

Dans le cas des ressources forestières, le tableau ci-dessous présente schématiquement **les grandes caractéristiques économiques des services non marchands** qu'elles procurent. Ils sont répartis en deux grandes catégories selon qu'ils se traduisent par des effets sur les équilibres écologiques ou sur le cadre de vie des individus. Pour les premiers, il s'agit de l'influence qu'exercent les espaces boisés sur la protection des sols, sur la qualité et le régime des eaux, sur la fixation du gaz carbonique atmosphérique ou enfin comme réservoir de nombreuses espèces animales et végétales. Certains de ces effets sont utilisés depuis longtemps. C'est le cas notamment de ceux permettant une fixation des sols dans des zones exposées à l'érosion et au ravinement (travaux de restauration des terrains en montagne, de protection des dunes littorales effectués en France dès le milieu du XIX[e] siècle). Les seconds concernent les rôles que jouent les espaces boisés dans la formation des paysages ou comme lieux d'activités de détente (promenade, cueillette, ...).

On note que beaucoup de services non marchands des forêts ne font pas l'objet d'une consommation directe et

TYPES DE BIENS	NATURE DES SERVICES	ÉTENDUE DES EFFETS	POPULATION CONCERNÉE
• Écologiques			
Physico-chimiques (sols, eaux, air)	usage indirect (effets sur autres biens d'environnement)	localisés (sols, eaux) non localisés (air)	résidents* toute la société
Biologiques (biodiversité)	usage différé (pour soi ou pour les générations futures)	non localisés	toute la société
• Aménités (récréation, paysage)	usage direct	localisés	résidents*

**par résidents on entend tous les individus qui, régulièrement (habitants) ou occasionnellement (touristes, passagers), bénéficient des services environnementaux de la forêt.*



Photo : L. Barbier

Chevreuil faon.

Hubert Robert. Vue des jardins de Versailles sur le Tapis vert. Conservation château de Versailles.
Détail angle inférieur gauche, groupe d'ouvriers bûcherons au repos avec marchands ambulants.



Photo : © G. Blot - RMN

bénéficient, *a priori*, à une population importante dont les contours sont malaisés à préciser. Aussi n'est-il pas surprenant que l'on ne dispose aujourd'hui que de peu d'éléments permettant d'estimer la valeur que la société leur accorde. La forte médiatisation de certains aspects particuliers (quelques espèces, notamment animales) et le déficit d'information accroissent la difficulté de cette estimation. D'autant plus que les forêts restent largement perçues comme des espaces "naturels" et collectifs faisant l'objet d'une forte appropriation symbolique de la part de la population bien qu'il s'agisse d'espaces cultivés et privatifs, même lorsqu'ils appartiennent à des propriétaires de droit public (État, collectivités locales). Elles semblent ainsi **cristalliser le "besoin de nature"** qu'entraîne l'artificialisation des modes de vie. Enfin, dans leur très grande majorité, les forêts françaises sont des espaces multifonctionnels, fournissant simultanément au même endroit des biens marchands et plusieurs services non marchands qui peuvent d'ailleurs s'avérer antagonistes (fréquentation touristique et protection de la faune et de la flore par exemple). Dans la plupart des cas, on est donc en présence de **territoires aux finalités multiples**, ce qui rend beaucoup plus délicat le choix des pratiques de gestion.

Il faut cependant souligner que la gestion forestière qui est généralement pratiquée est moins perturbante pour l'environnement qu'on ne le dit parfois. Ainsi, plus des deux tiers des forêts publiques françaises ont été répertoriées comme zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique ou floristique (ZNIEFF). Même dans les cas de sylviculture relativement intensive, la gestion des espaces boisés s'avère d'ailleurs sensiblement moins dégradante de l'environnement que la plupart des autres activités de production, voire de consommation. En tout état de cause elle ne produit jamais des nuisances graves et procure au contraire certains services.

Quoiqu'il en soit, la **gestion des services non marchands des forêts** s'effectue le plus souvent aujourd'hui de façon réglementaire ou est prise en charge par la puissance publique. C'est ainsi qu'en 1994 la collectivité a consacré 780 millions de francs à financer les travaux réalisés par l'Office National des Forêts en matière de protection des sols (montagne, dunes), de protection des biotopes (réserves biologiques), ou d'accueil du public. Lorsqu'elle procède par voie réglementaire, la gestion des services non marchands des forêts se traduit par un coût pour la collectivité en terme, par exemple, d'effets directs ou induits sur la production marchande. Elle résulte alors d'un compromis entre les différentes parties prenantes dont il n'est pas certain qu'il corresponde à l'équilibre optimal souhaité par la société. C'est l'un des enjeux importants de la recherche que de fournir progressivement des éléments biologiques et économiques objectifs permettant de guider au mieux les choix en la matière.

Dominique Normandin,
Économie et Politique agricole
et forestière, ENGREF-INRA,
14 rue Girardet 54042 Nancy ■

Pour en savoir plus

• Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. La gestion durable des forêts françaises.
Direction de l'Espace rural et de la Forêt, 1995, 76 pages.

• Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.
Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises.
Direction de l'Espace rural et de la Forêt, 76 pages.

• Patrimoines naturels forestiers. Revue forestière française, numéro spécial 1991, 223 pages.

4 Un scénario nouveau ou revisité : l'agroforesterie

L'agroforesterie peut être définie comme un ensemble de systèmes d'utilisation du territoire qui associent des arbres ou d'autres végétaux ligneux pérennes et des productions végétales ou animales sur la même unité de surface. De nombreux systèmes agroforestiers traditionnels fonctionnent de par le monde, revêtant des formes multiples, par exemple : arbres fourragers ou arbres multi-usages, haies vives, cultures intercalaires entre arbres fruitiers, jachères améliorées en cultures itinérantes, jardins familiaux, brise-vent, pâturage en forêt, ...



Systèmes sylvopastoraux méditerranéens. Dans le Buech, les éleveurs ovins mettent à profit les peuplements éclaircis de chêne blanc par un pâturage de fin de printemps.

Photo : M. Etienne

Dans les pays "développés", les progrès de l'agriculture et des sciences agronomiques ont entraîné le développement de monocultures intensives et une nette séparation des différentes productions dans l'espace. Pour mieux maîtriser les régénérations naturelles, la gestion sylvicole a supprimé le pâturage en forêt et s'est orientée préférentiellement vers la futaie dense pour la production de bois d'œuvre. Les systèmes traditionnels jugés peu productifs sont ainsi tombés en désuétude.

Cependant, le développement irraisonné de monocultures intensives a parfois mené à des dégradations de l'environnement : certains exemples de remembrement du bocage breton ont accentué les dégâts causés par l'érosion torrentielle et éolienne, la mise en défens excessive des forêts méditerranéennes en conjonction avec un exode rural important a favorisé le développement d'une végétation arbustive hautement combustible, le développement de l'agriculture intensive a provoqué par endroits des problèmes de pollution des eaux par des concentrations trop élevées de nitrates, ...

D'autre part, les systèmes agricoles modernes requièrent souvent des quantités importantes d'intrants (fertilisants, pesticides, herbicides), entraînant des coûts de production élevés et des risques environnementaux.

Face aux demandes multiples de la société actuelle, tant concernant la politique agricole que la politique environnementale, diverses formes d'agroforesterie, traditionnelles ou modernisées, ainsi que des pratiques nouvelles en cours de développement, peuvent apporter des solutions.

Bien que les progrès de la recherche, fondamentale et appliquée, aient favorisé le développement de disciplines permettant d'approfondir les connaissances de chacune des parties, les sciences de synthèse qui ont progressé moins rapidement s'intéressent à présent de

plus en plus aux systèmes complexes tels que l'agroforesterie. Des recherches sur l'agroforesterie se poursuivent depuis déjà une vingtaine d'années, principalement en régions tropicales. Elles ont porté dans un premier temps sur la caractérisation des systèmes agroforestiers traditionnels.

À présent les recherches s'orientent vers la compréhension du fonctionnement des systèmes agroforestiers et leurs retombées économiques et écologiques, et le développement de systèmes adaptés aux contraintes socio-économiques actuelles.

En Europe, et plus particulièrement en France, on rencontre schématiquement quatre types de systèmes dits agroforestiers au sens large :
• les parcours ou le pâturage en forêt,
• les arbres sur parcelles agricoles, soit sur prairies pâturées, soit avec cultures,
• les haies,
• la forêt "paysanne" *.

Les acquis de la recherche

Les systèmes agroforestiers

Par leur diversité et leur souplesse, les systèmes agroforestiers peuvent être les moteurs d'un développement durable, mais ceci nécessite une gestion conjointe de l'ensemble des éléments qui les composent.

Certains systèmes agroforestiers mal gérés peuvent provoquer des dégâts à l'environnement, comme par exemple les problèmes d'érosion dus au surpâturage dans les parcours boisés, encore de nos jours particulièrement difficiles à gérer dans les régions arides ou méditerranéennes. Une analyse des échecs montre que dans la plupart des cas ceux-ci proviennent de l'omission d'un ou plusieurs éléments.

Le surpâturage dans certains systèmes sylvopastoraux du sud de la Méditerranée provient essentiellement de l'impossibilité de maîtriser à la fois les troupeaux et la forêt. La multiplicité des acteurs d'origines diverses et aux objectifs généralement contradictoires, essentiellement éleveurs et gestionnaires forestiers, rend extrêmement difficile la gestion globale, et chaque participant agit selon ses propres intérêts. L'éleveur recherche la meilleure ressource alimentaire du troupeau, le forestier la protection optimale de la forêt. Or, une part importante de la ressource se trouvant en forêt, en l'absence de concertation, un nombre important d'éleveurs peut faire paître de vastes troupeaux sous les arbres, entraînant des dégâts par abroutissement, écorçage, piétinement, et à terme des problèmes d'érosion. Réciproquement, une mise en défens prolongée de la forêt favorise le développement d'un sous-bois qui devient rapidement très combustible, et crée des conflits sociaux avec les éleveurs en manque de ressource.

Les recherches menées en vraie grandeur sur des massifs forestiers en région méditerranéenne française ont montré qu'avec une gestion saine de la forêt, prenant en compte l'ensemble des partenaires, on peut obtenir des systèmes sylvopastoraux durables, satisfaisant à la fois les forestiers gestionnaires de l'espace, les éleveurs, et les multiples autres utilisateurs de la forêt : chasseurs, promeneurs, apiculteurs, riverains, ainsi que les collectivités chargées de la défense contre les incendies. Dans de tels systèmes, si les aspects biologiques et techniques sont d'importance, les aspects sociaux, voire psychologiques, sont primordiaux. Un système sylvopastoral ne peut être durable si c'est une simple juxtaposition d'intérêts, des éleveurs et des forestiers, mais nécessite que tous les acteurs aient une réflexion globale et prennent en compte l'ensemble de leurs partenaires dans leur propre démarche. Ainsi, plusieurs types de systèmes sylvopastoraux ont pu voir le jour, associant divers acteurs : éleveur installé en forêt publique gérée par l'Office National des Forêts, groupement d'éleveurs faisant pâturer des réseaux de pare-feux boisés gérés par des syndicats intercommunaux, gestion conjointe des écosystèmes naturels dans un parc naturel régional par l'ONF, les représentants des communes, des éleveurs... La mise en place de tous ces systèmes a nécessité de longues démarches dans lesquelles la recherche avait une place primordiale.

* Boisement appartenant à une exploitation agricole.

Les relations arbre-herbe-animal

Trois composantes biologiques principales entrent dans un système sylvopastoral : l'arbre, l'herbe, l'animal. Toutes ces composantes sont en interactions, qui peuvent être positives ou négatives. Le rôle du gestionnaire est de favoriser les premières et de diminuer l'effet des secondes.

Dans les premiers stades de la vie d'un arbre, celui-ci est très sensible à la concurrence herbacée et aux éventuels dégâts d'animaux. Les moyens de réduire la concurrence ou la sensibilité à la concurrence ont été recherchés :
• diverses techniques de désherbage, mécanique ou chimique, ou de paillage pour éliminer la concurrence herbacée,

Vaches tarines au repos sur un pare-feu des Maures.



Photo : M. Etienne

• divers types de protection contre les animaux, comme par exemple les protections individuelles à effet de serre.

Lorsque les arbres ont dépassé ce stade, dont la durée dépend de l'espèce et du site, ce sont eux qui peuvent agir sur la croissance de l'herbe. Tant que l'espacement entre arbres est suffisant pour permettre la pénétration de la lumière (fermeture du couvert <70%), l'action principale de l'arbre sur l'herbe est un décalage phénologique, qui peut s'avérer particulièrement bénéfique pour l'alimentation des troupeaux :

• en début de printemps la croissance de l'herbe peut être retardée, mais à une période où la ressource fourragère est généralement suffisante hors forêt,

• en fin de printemps lorsque l'herbe commence à se raréfier et se dessécher dans les prairies, la présence d'arbres fournit un abri permettant le maintien d'un couvert herbacé pendant plusieurs semaines,

• en début d'hiver l'abri des arbres peut encore permettre une certaine croissance de l'herbe alors que les températures en plein découvert peuvent devenir négatives.

Par contre un couvert forestier dense élimine toute ressource fourragère, il peut simplement servir d'abri pour les animaux lors de conditions climatiques défavorables. L'effet d'abri apporté par les arbres pour les animaux peut améliorer considérablement le rendement en viande, en diminuant les déperditions de chaleur.

Lorsqu'en forêt la végétation naturelle est insuffisamment appétente ou nutritive, il peut s'avérer nécessaire d'effectuer des améliorations pastorales : sursemis d'espèces fourragères adaptées aux conditions du milieu, en particulier à l'ombre des arbres, fertilisations, et éventuellement débroussaillages manuels ou mécaniques. Certaines espèces fourragères, telles que le trèfle souterrain, s'avèrent bien adaptées. D'autres, comme le lotier très utilisé en Nouvelle Zélande, sont encore en cours d'étude dans les conditions françaises.

Il faut noter que chaque action technique peut avoir des effets bénéfiques à court terme, mais que cet effet s'estompe très rapidement s'il n'est pas l'objet d'un suivi sur le long terme. Une expérience menée pendant dix ans en forêt naturelle a montré que ce n'est qu'après les cinq premières années que les améliorations, dont le coût décroît régulièrement du fait des actions précédentes, ont un effet réellement durable. Le coût d'entretien d'une parcelle sylvopastorale bien gérée devient alors très inférieur au débroussaillage mécanique ou manuel classique, nécessité par la prévention contre les incendies.

Si la maîtrise de la végétation est indispensable pour l'alimentation du troupeau, inversement la conduite du troupeau doit être adaptée à la présence d'arbres. Afin d'éviter les dégâts, une éducation du troupeau peut être très bénéfique : des animaux habitués provoqueront moins de dégâts que de jeunes bêtes nouvellement mises en présence d'arbres. D'autre part, si la ressource fourragère s'avère insuffisante, les arbres eux-mêmes peuvent devenir une source d'alimentation, d'où encore l'importance d'adopter une gestion globale du système.

Les arbres

Les progrès de la sylviculture et de la génétique forestière ont favorisé la plantation d'espèces à fort potentiel de production, en particulier pour du bois de haute qualité. L'agroforesterie ou la forêt paysanne, par la présence d'un agriculteur à proximité, permet une gestion sylvicole relativement intensive, proche de la "culture d'arbres". Le suivi des arbres individuels est favorisé, comme par la taille de formation et l'élagage qui sont nécessaires pour obtenir du bois de qualité, ou la surveillance phytosanitaire. Ainsi la conjonction de matériel génétique performant et de la présence d'un gestionnaire intéressé par les arbres et leur culture permet d'assurer la pérennité du système.

Cycles biogéochimiques

L'intensification de l'agriculture a parfois provoqué une pollution des nappes par des concentrations élevées en éléments minéraux, tels que l'azote, ou en produits phytosanitaires. Afin de remédier à cette situation il est souvent fait appel aux arbres ou à la forêt comme "dépolluant". L'étude des cycles des éléments minéraux dans le sol, les plantes, et l'atmosphère, montre que les quantités mobilisées par les arbres sont généralement très faibles par rapport aux quantités mises en jeu dans l'ensemble de l'écosystème. L'agroforesterie par elle-même, par la diversification des activités sur le territoire agricole et la réduction de pratiques agricoles très intensives, a un effet globalement positif, mais un système agroforestier ne peut contribuer que très faiblement à l'épuration des éléments provenant de régions de culture intensive voisines.

De même en ce qui concerne l'immobilisation du carbone, en vue de réduire la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique à effet de serre, les biomasses mises en jeu dans les systèmes agroforestiers s'avèrent négligeables par rapport aux émissions dues aux activités industrielles. Par une diminution de l'intensification, des pratiques agroforestières saines peuvent diminuer les intrants comme les fertilisants ou pesticides, et par là même partiellement contribuer à réduire les émissions de polluants.

Érosion

Face aux catastrophes qui ont eu lieu à la suite du remembrement massif dans certaines régions, les effets des haies sur l'environnement ont été très largement étudiés. Les effets sur la circulation de l'eau et des particules à la surface et dans le sol ont ainsi pu être bien quantifiés. Le microclimat dans les régions bocagères ou autour de réseaux de brise-vent a lui aussi été bien quantifié, montrant par exemple que la structure optimale d'un brise-vent doit être légèrement poreuse afin de réduire les turbulences, et permettant de quantifier avec une bonne précision la distance protégée par une haie selon sa hauteur et sa structure.

L'avenir

Jusqu'à présent, la recherche a permis de caractériser et de commencer à comprendre le fonctionnement de systèmes agroforestiers traditionnels, et de les améliorer. Les recherches se développent actuellement dans trois directions complémentaires :

- l'approfondissement des connaissances fondamentales sur les phénomènes de compétition entre éléments du système,
- la synthèse des connaissances acquises dans ces systèmes particulièrement complexes, notamment par le développement de modèles,
- le développement de nouvelles pratiques agroforestières, adaptées aux exigences et contraintes de la société actuelle.

Phénomènes de compétition

Ainsi qu'il a été dit ci-dessus, la recherche a commencé à étudier les phénomènes biologiques d'interactions entre herbe, arbre, et animal. Cependant si la compréhension des phénomènes progresse, leur quantification précise demeure encore insuffisante. On s'attache à préciser par exemple la répartition de la lumière dans une parcelle agroforestière, en quantité et en qualité, et son influence sur la température, qui agit elle-même sur la respiration, la transpiration, la phénologie. La compétition pour l'eau et les éléments minéraux a lieu principalement dans le sol, et des recherches se développent sur le fonctionnement des systèmes racinaires.

Essai d'introduction de cultures fourragères dans un peuplement éclairci d'épicéas en Auvergne.



Photo : M. Etienne

Analyse des systèmes

Du fait de la complexité des systèmes agroforestiers, les interactions entre éléments peuvent avoir des effets de rétroaction, difficiles à appréhender dans l'étude de chaque composant individuel. Une meilleur connaissance passe par la modélisation, intégrant l'ensemble des phénomènes. De tels modèles basés sur le fonctionnement biologique sont en cours de développement.

Mais les aspects socio-économiques sont souvent primordiaux et la recherche s'oriente vers le couplage entre modèles biophysiques et modèles économiques. Ainsi l'intégration de parcelles agroforestières au sein d'une exploitation agricole ou animale modifie les pratiques de l'agriculteur et peut nécessiter des changements de structure. Des changements s'opèrent globalement, non seulement sur une exploitation agricole, mais sur le paysage. Ces phénomènes qui prennent une ampleur croissante de nos jours sont en cours d'étude.

Nouvelles agroforesteries

Les progrès dans les connaissances acquises en analysant les systèmes traditionnels permettent d'une part d'améliorer ces derniers et de les orienter selon les objectifs des gestionnaires ou des collectivités, mais d'autre part de proposer des systèmes nouveaux, mieux adaptés aux objectifs actuels.

Ainsi l'expérience acquise dans les systèmes sylvopastoraux méditerranéens orientés vers la défense contre les incendies, a permis d'expérimenter des systèmes adaptés à la foresterie moderne dans des régions plus tempérées. Les progrès de la génétique permettent de conduire les peuplements forestiers à des densités beaucoup plus faibles que traditionnellement, mais entraînant en contrepartie un développement de la végétation basse ; celle-ci peut être gérée conjointement avec un élevage afin de profiter à la fois de production ligneuse et de production animale, dans des conditions optimales.

Dans un contexte de déprise agricole, une solution actuellement expérimentée consiste à planter des arbres destinés à fournir du bois d'œuvre de haute qualité sur des parcelles agricoles, en mélange avec des cultures ou avec des prairies. Ainsi la vocation purement agricole devient-elle plus diversifiée, avec un objectif économique à plus long terme.

Les systèmes agroforestiers, s'ils sont gérés de manière optimale, sont aptes à répondre à un ensemble de demandes parfois contradictoires de la société contemporaine. Les apports de la connaissance ont permis de moderniser des pratiques traditionnelles qui étaient auparavant considérées comme archaïques, mais qui s'avèrent bien adaptées aux exigences de durabilité, et d'en développer de nouvelles encore mieux adaptées.

Daniel Auclair,
CIRAD-INRA, Unité de Modélisation des Plantes (AMAP),
BP 5035, 34032 Montpellier cedex 1 ■

Pour en savoir plus

• Auclair D., 1995. Agroforesterie : intégration et entretien de la production ligneuse dans l'exploitation agricole. In : 16ème conférence COLUMA, Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes. ANPP (ed.), Paris. Vol I, p. 135-144.
• Cailliez F. (ed.), 1995. Agriculteurs, agricultures et forêts. Actes de colloque, CEMAGREF éditions. Antony. 207 p.
• Étienne M. (ed.), 1996. Temperate and Mediterranean silvopastoral systems of Western Europe. Science Update, INRA, Paris. 275 p.
• Guitton J.L. (ed.), 1994. Agroforesterie en zone tempérée. Rev. for. Fr., 46, N° sp. 188 p.

Voir aussi "La forêt paysanne dans l'espace rural - Biodiversité, paysages, produits". Études et Recherches sur les Systèmes agraires et le Développement, n°29, 1996, 270 pages.

Cette planche provient d'une série de 6 affiches ▶ (bourgeons, feuilles, fruits, fleurs, troncs), conçue par Jeanine Goacolou vendue 50 F. les 6 à la DIC Paris, Salle d'Actualités et par correspondance INRA Éditions, Versailles.


L'Arbre
SON PORT
1 SAPIN
2 CHÂTAIGNIER
3 MÉLÈZE
4 FRÊNE
5 PEUPLIER
6 ÉPICÉA
7 ÉRABLE
8 CHÊNE
9 PIN
10 HÊTRE
11 CHARME
12 MERISIER
13 CÈDRE
14 BOULEAU
15 DOUGLAS
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
SCIENCES
RESSOURCES 91
Essonne
LE DÉPARTEMENT
INRA
Avec le soutien du Secrétariat d'Etat à la Recherche et de la Direction Régionale des Affaires Culturelles
CONCEPTION : J. GOACOLOU · MAQUETTE : AGENDA · PHOTOS : J. GOACOLOU · IMPRESSION : JOUVE Paris

Pour conclure

Au moment de refermer ce dossier, le lecteur aura certainement perçu la complexité de la notion de "gestion durable des forêts" et combien elle est sous-tendue par des bases scientifiques touchant à des domaines très divers, couverts par l'INRA et ses partenaires. Nous l'évoquions dès les premières lignes du document, la nécessité des choix a laissé dans l'ombre certains thèmes importants, qui participent également de la gestion durable. Parfois aussi, la présentation faite aura plus insisté sur l'aspect cognitif des recherches que sur leur valorisation.

Pourtant si l'on tente de dresser un bilan rapide des travaux de recherche menés par l'INRA, seul ou en collaboration, depuis 25 ans, ayant réellement débouché sur des innovations contribuant à rendre plus durable la gestion forestière, on peut mesurer les progrès accomplis, notamment dans les domaines suivants :

- caractérisation des milieux, de leurs potentialités et connaissances des exigences écologiques des espèces,
- connaissance de la diversité génétique des espèces et des conditions de son utilisation ou de sa conservation, production de variétés améliorées, en vue d'une meilleure **adaptation** aux conditions de milieu,
- outils d'aide à la décision pour la sylviculture et l'aménagement forestier : modèles de croissance,
- contrôle de la qualité du bois par la sylviculture (hêtre) ; prédiction de la valeur technologique d'une ressource locale ou régionale,
- élucidation de facteurs majeurs (édaphiques, climatiques, atmosphériques) responsables du dépérissement des forêts,
- méthodes biologiques (mycorhization dirigée) et physico-chimiques (amendement et fertilisation) de contrôle de la nutrition des arbres,
- méthodes de contrôle respectueuses de l'environnement de populations d'insectes ravageurs ou de micro-organismes pathogènes,
- connaissance des risques d'incendie et méthodes de contrôle (brûlage dirigé).

La dimension du champ à couvrir, en regard des moyens de recherche publics disponibles à l'INRA et dans d'autres organismes, a fait aussi que des thématiques majeures ont été peu ou insuffisamment abordées. En conséquence, des connaissances de base, susceptibles d'étayer **l'expertise**, font actuellement défaut.

Dans le domaine de la **biodiversité** liée à la gestion forestière, par exemple, il est clair que c'est surtout l'approche "naturaliste" qui a prévalu majoritairement jusqu'à présent, et qu'à ce titre, l'INRA était peu concerné. Il convient maintenant de faire un effort particulier sur les aspects **fonctionnels** de la biodiversité ; cette approche semble en particulier indispensable, si l'on veut voir le gestionnaire forestier disposer de critères pertinents pour les "aménagements".

Les **ressources en eau** en quantité et qualité sont largement dépendantes des couverts forestiers, mais ces relations sont encore mal connues. Plus généralement, les interrelations des écosystèmes forestiers avec les écosystèmes voisins (écologie du paysage) sont encore des domaines peu abordés.

Des études prospectives sérieuses montrent que les **plantations forestières** constitueront dans l'avenir des enjeux importants. Leur viabilité écologique et économique suppose encore des travaux soutenus de recherche. Parmi les aspects peu évoqués dans ces dossiers, il faut citer en particulier :

• la sélection pour les critères d'**adaptation** : efficience de l'eau, résistance à la sécheresse ; de nouvelles perspectives s'ouvrent avec la sélection assistée par marqueurs,

• l'amélioration de la **qualité du bois** par voies génétique et sylvicole en vue de créer une ressource **compétitive** pour nos industries.

La promotion du matériau "bois" et sa compétitivité par rapport à d'autres types de matériaux supposent de démontrer aussi sa "supériorité environnementale" ; l'**analyse du cycle de vie** comparée prenant en compte le coût énergétique et l'ensemble des facteurs environnementaux : émission de carbone fossile, fixation du carbone, cycles de l'eau et de l'azote, utilisation d'intrants..., de l'élaboration du matériau (pour le bois, en forêt) jusqu'à son recyclage, devient un thème prioritaire.

Enfin, les Sciences de l'Homme et de la Société, notamment celles touchant à l'économie et aux politiques forestières, ou encore à la forêt dans l'aménagement du territoire, ont été globalement peu développées en France ; elles mériteraient un effort nettement plus important.

En terminant, comment ne pas souligner que ces enjeux et leur ampleur nécessitent un effort soutenu de collaboration. Les structures de partenariat existent : GIP ECOFOR (Écosystèmes Forestiers), GIS divers, unités associées ; il faut soutenir leurs actions.

Yves Birot,
INRA, chef du Département des Recherches Forestières,
Avenue Vivaldi, 84000 Avignon ■

Pour en savoir plus

• Y. Birot, J.F. Lacaze, 1994. La Forêt. Éditions Flammarion, coll. Dominos, 126 pages.
• Y. Birot, 1996. La recherche scientifique et la gestion durable des forêts : la contribution française. Revue forestière française, numéro spécial.
• Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 1995. La gestion durable des forêts françaises ; plan national de mise en oeuvre de la déclaration de principes forestiers adoptée par la CNUED (Rio de Janeiro, 1992) 76 pages.
• Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 1995. Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises ; document français de mise en oeuvre des décisions des pays participant aux conférences ministérielles pour la protection des forêts en Europe, 49 pages.

Directeur scientifique du dossier : Yves Birot
Directeur de la publication : Marie-Françoise Chevallier-Le Guyader
Responsable de l'INRA mensuel et de ses "Dossiers : Denise Grail
Secrétariat : Frédérique Chabrol
Maquette et PAO : Pascale Inzérillo
Photothèque INRA : Raditja Ilami et Lise Poulet
INRA, Direction de l'information et de la communication (DIC),
147 rue de l'Université, 75338 Paris Cedex 07. Tél : (1) 42 75 90 00.
Imprimeur : Graph 2000 / Photogravure : Vercingétorix
ISSN 1156-1653 Numéro de commission paritaire : 1799 ADEP

